



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Εκπαίδευση Ρομποτικών Χειρονομιών Βάσει
Πρωτογενών Δυναμικών Κινήσεων Σε
Περιβάλλον Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΗΤΡΑΚΗ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Τζαφέστας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

Εκπαίδευση Ρομποτικών Χειρονομιών Βάσει Πρωτογενών Δυναμικών Κινήσεων Σε Περιβάλλον Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΗΤΡΑΚΗ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Τζαφέστας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Οκτωβρίου 2019.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Τζαφέστας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πέτρος Μαραγκός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αλέξανδρος Ποταμιάνος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

(Υπογραφή)

.....

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΗΤΡΑΚΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2019 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής

Copyright © Αθανάσιος Μητράκης, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται και υλοποιείται μια μέθοδος για την διδασκαλία χειρονομιών από άνθρωπο σε ανθρωπόμορφο ρομπότ με στόχο την αναπαραγωγή των χειρονομιών αυτών από το ρομπότ κατά την Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ (Human-Robot Interaction). Η διδασκαλία κάθε χειρονομίας βασίζεται σε Μάθηση από Επίδειξη (Learning from Demonstration) και χρησιμοποιεί καταγεγραμμένες κινήσεις ανθρωπίνων χεριών που εκτέλεσαν τη χειρονομία αυτή. Οι διακριτές και οι περιοδικές χειρονομίες κωδικοποιούνται μέσω του μοντέλου των Πρωτογενών Δυναμικών Κινήσεων (Dynamic Movement Primitives), το οποίο χρησιμοποιεί μη γραμμικά δυναμικά συστήματα για την αναπαράσταση της κίνησης και έχει τη δυνατότητα να γενικεύσει τις χειρονομίες αυτές αναλόγως, διατηρώντας τη γενικότερη μορφή τους. Η εκπαίδευση ενός συνδυασμού μιας διακριτής και μιας περιοδικής κίνησης καθίσταται επίσης δυνατή με τη χρήση των Πρωτογενών Δυναμικών Κινήσεων Τροποποιημένων Συντεταγμένων (Coordinate Changed Dynamic Movement Primitives), οι οποίες αποτελούν μια τροποποίηση των αρχικών δυναμικών συστημάτων. Επιπλέον, η εκπαίδευση πιο σύνθετων χειρονομιών που εκφράζουν μια πρόσθετη συμπεριφορά, σύμφωνα με κάποια παράμετρο του περιβάλλοντος, μπορεί να υλοποιηθεί με την προσθήκη Όρων Σύζευξης (Coupling Terms) στα αρχικά δυναμικά συστήματα. Για τον έλεγχο της λειτουργίας της μεθόδου εκπαίδευσης, επιλέχθηκαν για κάθε κατηγορία κινήσεων κάποιες χειρονομίες, οι οποίες καταγράφηκαν, διδάχθηκαν, γενικεύθηκαν και αναπαράχθηκαν από ένα ρομπότ NAO σε περιβάλλον προσομοίωσης. Η σύγκριση των γενικευμένων χειρονομιών με τις καταγεγραμμένες χειρονομίες επέδειξε την καταλληλότητα της μεθόδου αυτής για την εκπαίδευση ρομποτικών χειρονομιών πολλαπλών κατηγοριών.

Λέξεις Κλειδιά

Εκπαίδευση ρομποτικών χειρονομιών, Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις, Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ, Μάθηση από Επίδειξη, μη γραμμικά δυναμικά συστήματα, Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις Τροποποιημένων Συντεταγμένων, Όροι Σύζευξης, NAO

Abstract

This diploma thesis suggests and implements a method for teaching robotic gestures to a humanoid robot by a human, so that the robot can use these gestures to facilitate Human-Robot Interaction. The learning of each gesture is based on Learning from Demonstration and uses the recorded movements of human hands that demonstrated that gesture. Discrete and periodic gestures are encoded using the Dynamic Movement Primitives framework, which uses nonlinear dynamic systems to represent a movement and is able to generalize these gestures accordingly, maintaining their shape in general. The training of a combination between discrete and periodic gestures also becomes possible through the use of Coordinate Changed Dynamic Movement Primitives, which is a modified version of the original dynamic systems. Furthermore, the training of more complex gestures that express an additional behaviour, according to some environmental parameter, can be implemented with the inclusion of Coupling Terms in the original dynamic systems. In order to test the operation of the training method for each type of movement, a series of gestures were selected and then recorded, taught, generalized and finally reproduced by a NAO robot in a simulated environment. A comparison between the generalized gestures and the recorded gestures demonstrated the suitability of this method for the training of various types of robotic gestures.

Keywords

Robotic gesture training , Dynamic Movement Primitives, Human-Robot Interaction, Learning from Demonstration, nonlinear dynamic systems, Coordinate Changed Dynamic Movement Primitives, Coupling Terms, NAO

Ευχαριστίες

Θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Τζαφέστα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία, τη συνεχή καθοδήγηση του και το χρόνο που διέθεσε για τις συζητήσεις μας κατά την εκπόνηση της. Οι συμβουλές του ήταν ανεκτίμητες και καθοριστικές για τη συγγραφή και την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής για τη βοήθεια τους κατά την υλοποίηση του πρακτικού σκέλους της εργασίας και ιδιαίτερα τους Αθανάσιο Δομέτιο και Παρασκευά Οικονόμου για τις καθοριστικές συμβουλές που μου έδωσαν για τη βελτίωση της.

Τέλος, ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τους γονείς μου Ιωάννη και Χρυσούλα και την αδερφή μου Νικολέττα για τη συνεχή καθοδήγηση τους και την αμέριστη στήριξη τους σε όλα τα επίπεδα, όχι μόνο κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	17
1 Εισαγωγή	19
1.1 Ρομποτική και χρήσεις των ρομπότ στην καθημερινότητα	19
1.2 Αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ	19
1.3 Μάθηση από Επίδειξη	20
1.4 Στόχοι της εργασίας	21
1.5 Συνεισφορά της εργασίας	22
1.6 Δομή της εργασίας	23
2 Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις (DMPs)	25
2.1 DMPs για διακριτές κινήσεις	25
2.2 DMPs για περιοδικές κινήσεις	29
2.3 DMPs για μεικτές κινήσεις	31
2.4 Όροι Σύζευξης (Coupling Terms)	33
3 Περιγραφή Μεθοδολογίας Εκπαίδευσης Ρομποτικών Χειρονομιών βάσει Επίδειξης	35
3.1 Διακριτές κινήσεις ενός χεριού	36
3.1.1 Διδασκαλία	36
3.1.2 Γενίκευση	37
3.2 Περιοδικές κινήσεις ενός χεριού	37
3.2.1 Διδασκαλία	37

3.2.2	Γενίκευση	39
3.3	Μεικτές κινήσεις ενός χεριού	40
3.3.1	Διδασκαλία	40
3.3.2	Γενίκευση	43
3.4	Κινήσεις εκτελούμενες από δύο χέρια	44
3.4.1	Διδασκαλία	45
3.4.2	Γενίκευση	45
3.5	Παραμετροποιημένες κινήσεις ενός χεριού	45
3.5.1	Διδασκαλία	46
3.5.2	Γενίκευση	46
3.6	Μέθοδος γενίκευσης βάσει πολλαπλών δεδομένων επίδειξης	47
4	Πρακτική Υλοποίηση Συστήματος Εκπαίδευσης Χειρονομιών στο Ρομπότ NAO	49
4.1	Επιλογή και καταγραφή κινήσεων	49
4.2	Επεξεργασία μετρήσεων	54
4.2.1	Προεπεξεργασία μετρήσεων	54
4.2.2	Φιλτράρισμα με χρήση φίλτρου Savitzky-Golay	59
4.2.3	Εύρεση αρχής και πέρατος κίνησης	62
4.3	Εκτέλεση κινήσεων από ρομπότ	63
4.3.1	Ανθρωπόμορφο ρομπότ NAO	63
4.3.2	Περιβάλλον προσομοίωσης Choregraphe	63
4.3.3	Μετατροπή των δεδομένων κίνησης από το ανθρώπινο μοντέλο στο μοντέλο του ρομπότ NAO	65
5	Πειραματικά Αποτελέσματα	69
5.1	Επιλογή παραμέτρων μοντέλου DMP	69
5.2	Αποτελέσματα διακριτών κινήσεων ενός χεριού	71
5.2.1	Δεικτική κίνηση	71
5.3	Αποτελέσματα περιοδικών κινήσεων ενός χεριού	76
5.3.1	Χειρονομία χαιρετισμού	76
5.4	Αποτελέσματα μεικτών κινήσεων ενός χεριού	81
5.4.1	Χειρονομία καθαρισμού	81
5.5	Αποτελέσματα παραμετροποιημένων κινήσεων ενός χεριού	93
5.5.1	Δεικτική κίνηση με συναίσθημα	93
5.6	Αποτελέσματα κινήσεων εκτελούμενων από δύο χέρια	97
5.6.1	Χειρονομία σχήματος τριγώνου	98
6	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	103
6.1	Συμπεράσματα	103
6.1.1	Περίληψη της εργασίας	103
6.1.2	Υποθέσεις, παραδοχές και επιλογές που έγιναν στην πορεία της εργασίας	103

6.1.3	Περιορισμοί του αλγορίθμου και της υλοποίησης	104
6.1.4	Αξιολόγηση της υλοποίησης και των αποτελεσμάτων	105
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	106
Βιβλιογραφία		109

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για διακριτές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσεις του χρόνου για $\tau = 1$	27
2.2	Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για διακριτές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσεις της μεταβλητής φάσης x για $\alpha_x = 4.6$ και $\tau = 1$	28
2.3	Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για περιοδικές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσεις της μεταβλητής φάσης ϕ για $\Omega = 2\pi$	30
4.1	Ταξινόμηση χειρονομιών (από το [1])	50
4.2	Πλέγμα καταγραφής μετρήσεων	50
4.3	Το σύστημα μαγνητικών αισθητήρων 3D Guidance trakSTAR της εταιρίας Ascension (μονάδα ελέγχου, μαγνητικοί αισθητήρες, μαγνητικός πομπός) . . .	51
4.4	Απεικόνιση προεπιλεγμένων συστημάτων αναφοράς πομπού και αισθητήρων . .	51
4.5	Απεικόνιση της θέσης των αισθητήρων στο ανθρώπινο χέρι	52
4.6	Απεικόνιση διάταξης καταγραφής και τελικών συστημάτων αναφοράς χώρου, αισθητήρων και πομπού στο χώρο διενέργειας μετρήσεων	53
4.7	Απεικόνιση τιμών γωνιών Euler στην κατάσταση gimbal lock ($t = 3, 35 s$) . .	58
4.8	Απόκριση συχνότητας του φίλτρου Savitzky-Golay για διαφορετικούς βαθμούς πολωνύμου N	61
4.9	Απόκριση συχνότητας του φίλτρου Savitzky-Golay για διαφορετικά μήκη πα- ραθύρου F	61
4.10	Διαστάσεις και σύστημα αναφοράς του ανθρωπόμορφου ρομπότ NAO	64
4.11	Κέντρα συστημάτων αναφοράς και μήκη χεριών για το ανθρώπινο σώμα (αρι- στερά) και το σώμα του ρομπότ NAO (δεξιά)	66
5.1	Μέσο απόλυτο σφάλμα μεταξύ καταγραφής και αναπαραγωγής συναρτήσεων του αριθμού των ακτινικών συναρτήσεων βάσης για μια διακριτή κίνηση μικρής διάρκειας (μπλε), μια διακριτή κίνηση μεγαλύτερης διάρκειας (κόκκινο) και μια περιοδική κίνηση (πράσινο)	70
5.2	Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3D χώρο με παράλληλη παρου- σίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για δεικτική κίνηση	71

- 5.3 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 72
- 5.4 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για δεικτική κίνηση 73
- 5.5 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 73
- 5.6 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y σε μια διακριτή δεικτική κίνηση. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) 74
- 5.7 Σύγκριση καταγεγραμμένων τροχιών (μπλε) και των αντίστοιχων γενικευμένων τροχιών (κόκκινο) του δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο για μια δεικτική χειρονομία. Απεικονίζεται επίσης η διδασκόμενη τροχιά (πράσινο) 75
- 5.8 Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για χειρονομία χαιρετισμού 77
- 5.9 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας χαιρετισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 78
- 5.10 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για χειρονομία χαιρετισμού 79
- 5.11 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας χαιρετισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 79
- 5.12 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y σε μια περιοδική χειρονομία χαιρετισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης ϕ (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Γ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) 80
- 5.13 Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για τη μεικτή χειρονομία καθαρισμού 82

- 5.14 Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το διακριτό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού 83
- 5.15 Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού 84
- 5.16 Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο τοπικό σύστημα αναφοράς του οδηγού 85
- 5.17 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας καθαρισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 85
- 5.18 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το διακριτό τμήμα της μεικτής χειρονομίας καθαρισμού 86
- 5.19 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο τοπικό σύστημα αναφοράς του οδηγού 87
- 5.20 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο καθολικό σύστημα αναφοράς 88
- 5.21 Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για τη μεικτή χειρονομία καθαρισμού 89
- 5.22 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας καθαρισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 89
- 5.23 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του διακριτού τμήματος μιας μεικτής χειρονομίας καθαρισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) 90

- 5.24 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του περιοδικού τμήματος μιας μεικτής χειρονομίας καθαρισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης ϕ (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Γ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) 91
- 5.25 Θέση (πάνω αριστερά), ταχύτητα (πάνω δεξιά) και επιτάχυνση (κάτω αριστερά) στον άξονα y για μια μεικτή χειρονομία καθαρισμού 92
- 5.26 Τροχιές αισθητήρα δεξιού χεριού για την απλή κίνηση (μπλε) και για την ένονη κίνηση (κόκκινο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση με συναίσθημα . . . 94
- 5.27 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης απλής δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 94
- 5.28 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης έντονης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 95
- 5.29 Σύγκριση των τροχιών του δεξιού χεριού για την απλή κίνηση (μπλε) και την ένονη κίνηση (κόκκινο) στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (πράσινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση με συναίσθημα 96
- 5.30 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης παραμετροποιημένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 96
- 5.31 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα z σε μια παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση. Απεικονίζονται οι θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω δεξιά), η επιτάχυνση (κέντρο αριστερά), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) 97
- 5.32 Τροχιές αισθητήρων δεξιού (μπλε) και αριστερού (κόκκινο) χεριού στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς τους (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για χειρονομία σχήματος τριγώνου 98
- 5.33 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 99

- 5.34 Σύγκριση αρχικών τροχιών δεξιού (μπλε) και αριστερού (κόκκινο) χεριού στον 3Δ χώρο με τις υπολογισμένες κατά τη γενίκευση τροχιές δεξιού (πράσινο) και αριστερού (γαλάζιο) χεριού με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς των χεριών για χειρονομία σχήματος τριγώνου 100
- 5.35 Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά) 101
- 5.36 Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του δεξιού χεριού για χειρονομία σχήματος τριγώνου. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω) . . . 102

Κατάλογος Πινάκων

5.1 Μέσο απόλυτο σφάλμα γενίκευσης μιας διακριτής δεικτικής κίνησης	76
5.2 Μέσο απόλυτο σφάλμα μεταβλητότητας της ανθρώπινης κίνησης για μια δια- κριτή δεικτική κίνηση	76

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ρομποτική και χρήσεις των ρομπότ στην καθημερινότητα

Η έννοια της λέξης “ρομπότ” είναι εκείνη μιας αυτόματης προγραμματιζόμενης συσκευής που δύναται να εκτελέσει μια πολύπλοκη σειρά εργασιών ([21]). Τέτοιου είδους συσκευές χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατα των ανθρώπων σε διάφορες εργασίες (συνήθως σε βιομηχανικά περιβάλλοντα) και συχνά έχουν ανθρώπινη μορφή ή τη μορφή ανθρώπινου βραχίονα.

Η χρησιμότητα των ρομπότ οδήγησε στη δημιουργία της επιστήμης της Ρομποτικής, αντικείμενο της οποίας είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία των ρομπότ και των υπολογιστικών συστημάτων υπεύθυνων για τον έλεγχό τους. Όπως είναι φυσικό, η Ρομποτική αντλεί γνώση από πολλαπλούς τομείς όπως η Μηχανική, η Ηλεκτρονική και η Πληροφορική.

Η μορφή των ρομπότ ποικίλει και εξαρτάται κυρίως από τη χρήση για την οποία σχεδιάζονται. Μια κατηγορία ρομπότ στην οποία δίνεται μεγάλη προσοχή είναι τα ανθρωπόμορφα ρομπότ, τα οποία εν γένει ποικίλουν σε μεγέθη και δυνατότητες. Τα ρομπότ αυτά σχεδιάζονται με γνώμονα τη δυνατότητα εκτέλεσης πολλαπλών εργασιών, με στόχο την υποβοήθηση ή και την αντικατάσταση των ανθρώπων σε ορισμένα σενάρια.

1.2 Αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ

Ένας κλάδος της Ρομποτικής ο οποίος προσελκύει πληθώρα ερευνητών σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα τις τελευταίες δεκαετίες είναι εκείνος της “Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ” (Human-Robot Interaction (HRI)). Η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως η επικοινωνία, είτε μέσω προφορικού λόγου είτε μέσω χειρονομιών, και η συνεργασία προς επίτευξη ενός στόχου, η οποία συχνά εμπεριέχει χειρισμό αντικειμένων. Η ποικιλία και πολυπλοκότητα της αλληλεπίδρασης καθιστά αναγκαία τη σύμπραξη διαφόρων γνωστικών πεδίων όπως οι κοινωνικές επιστήμες, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας, η όραση υπολογιστών και η τεχνητή νοημοσύνη.

Στόχος της έρευνας που διεξάγεται σε αυτόν τον τομέα είναι ο σχεδιασμός ανθρωπόμορφων ρομπότ και η ανάπτυξη αλγορίθμων και λειτουργιών για αυτά, ούτως ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα και η φυσικότητα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ. Ένα τμήμα του τομέα αυτού είναι ο προγραμματισμός της κίνησης των χεριών ενός ρομπότ με στόχο την εκτέλεση μιας ενέργειας. Μια μέθοδος προγραμματισμού που χρησιμοποιείται συχνά είναι η “Μάθηση από Επίδειξη” (Learning from Demonstration (LfD)), η οποία βασίζεται στην εξαγωγή πληροφοριών από έναν αριθμό επιδείξεων της επιθυμητής κίνησης που έχουν πραγματοποιηθεί από κάποιον άνθρωπο-εκπαιδευτή. Η μέθοδος αυτή καθιστά πιο φυσική την αλληλεπίδραση με κάποιο ρομπότ, καθώς δεν απαιτεί εξαντλητικό προγραμματισμό από την πλευρά του χρήστη.

1.3 Μάθηση από Επίδειξη

Μια προσπάθεια υλοποίησης της Μάθησης από Επίδειξη αποτελεί η μοντελοποίηση κινήσεων με τη χρήση στατιστικών μεθόδων. Στο [22] χρησιμοποιούνται Κρυφά Μαρκοβιανά Μοντέλα (Hidden Markov Models (HMMs)) για την κωδικοποίηση των χωρικών και χρονικών παραλλαγών που υπάρχουν μεταξύ των τροχιών διαφορετικών επιδείξεων μιας κίνησης. Ύστερα από την εκπαίδευση του μοντέλου επιλέγεται η τροχιά η οποία παρουσιάζει την υψηλότερη πιθανότητα, δηλαδή εκείνη που αντιπροσωπεύει περισσότερο την κίνηση σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τροχιές. Η τροχιά αυτή χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή της κίνησης.

Στο [3], αντί των HMMs χρησιμοποιούνται Γκαουσιανά Μοντέλα Μείξης (Gaussian Mixture Models (GMMs)) για την κωδικοποίηση ενός συνόλου τροχιών και Παλινδρόμηση Γκαουσιανής Μείξης (Gaussian Mixture Regression (GMR)) για την ανάκτηση ομαλών γενικευμένων εκδοχών των τροχιών επίδειξης και της σχετικής μεταβλητότητας τους.

Μια διαφορετική προσπάθεια υλοποίησης της Μάθησης από Επίδειξη αποτελεί η μοντελοποίηση κινήσεων με τη χρήση δυναμικών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε στα [10] και [9] και συνδυάζει μη γραμμικά δυναμικά συστήματα για εύρωστη κωδικοποίηση των τροχιών και τεχνικές παλινδρόμησης για τη διαμόρφωση συναρτήσεων έλξης σύμφωνα με τις τροχιές που έχουν επιδειχθεί. Οι πολιτικές ελέγχου των κινήσεων που εφαρμόζει η μέθοδος αυτή ονομάστηκαν Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις (Dynamic Movement Primitives (DMPs)).

Όσον αφορά την επίδειξη κινήσεων και τη συλλογή δεδομένων από αυτές, υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις. Μια μέθοδος συλλογής δεδομένων από ανθρώπινη επίδειξη είναι η “Κιναισθητική μάθηση” (Kinesthetic teaching) ([11], [2]), όπου η επίδειξη γίνεται με απευθείας έλεγχο των αρθρώσεων και των συνδέσμων του ρομπότ από κάποιον άνθρωπο-εκπαιδευτή και καταγραφή της θέσης κάποιου στοιχείου δράσης ή των γωνιών των αρθρώσεων του ρομπότ. Στη μέθοδο αυτή η μάθηση εξαρτάται αυστηρά από τις δυνατότητες και τους βαθμούς ελευθερίας του ρομπότ που χρησιμοποιείται και χρειάζεται πολλαπλές επαναλήψεις ώστε ο εκπαιδευτής να μπορέσει να επιδείξει την επιλεγμένη κίνηση με την επιθυμητή ακρίβεια.

Μια άλλη μέθοδος συλλογής δεδομένων είναι η απευθείας καταγραφή των γωνιών των αρθρώσεων του εκπαιδευτή και της θέσης των άκρων του μέσω κάποιου συστήματος αισθητήρων ([19]) όσο εκείνος επιδεικνύει τις επιλεγμένες κινήσεις. Η μέθοδος αυτή είναι πιο φυσική και ενστικτώδης για τον εκπαιδευτή και οι κινήσεις μπορούν να μεταφερθούν με τον κατάλληλο μετασχηματισμό σε διάφορα ρομπότ διαφορετικών διαστάσεων και βαθμών ελευθερίας με αρκετά καλή επίδοση.

1.4 Στόχοι της εργασίας

Ένα παράδειγμα έρευνας στον τομέα της Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ αποτελεί το ευρωπαϊκό πρόγραμμα BabyRobot (<http://babyrobot.eu>). Ένα από τα αντικείμενα έρευνας στον τομέα αυτό, αλλά και ένας από τους βασικούς στόχους του προγράμματος BabyRobot είναι η ανάπτυξη βασικών λειτουργιών για την υποστήριξη φυσικής αλληλεπίδρασης και συνεργασίας μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ σε διάφορα περιβάλλοντα (οικιακό, εκπαιδευτικό, ιατρικής περίθαλψης, κ.α.). Μια από τις λειτουργίες αυτές είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός κινήσεων και ειδικότερα η κινηματική ανάλυση και η εκτέλεση χειρονομιών.

Η χρήση χειρονομιών για επικοινωνία έχει την πιθανότητα να εξελιχθεί σε πολύ σημαντικό σκέλος της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ, καθώς αποτελεί έναν από τους βασικούς τρόπους φυσικής και αβίαστης επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων. Η σωστή χρήση τους από κάποιο ρομπότ έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων και ρομπότ. Για να είναι όμως κάποιο ρομπότ σε θέση να πραγματοποιήσει κάποια χειρονομία, θα πρέπει πρώτα να διδαχθεί τον τρόπο με τον οποίο θα το κάνει. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με διδασκαλία βασισμένη σε ανθρώπινη επίδειξη.

Μέσω της παρούσας εργασίας ο συγγραφέας επιθυμεί να συνεισφέρει στην έρευνα που διεξάγεται στον τομέα της Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ και συγκεκριμένα στο ερευνητικό πρόγραμμα BabyRobot, μελετώντας και υλοποιώντας τεχνικές διδασκαλίας κίνησης από ανθρώπους σε ρομπότ και μοντέλα αναπαράστασης χειρονομιών.

Πρωτεύων στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διαμόρφωση και η υλοποίηση μιας μεθόδου, η οποία θα εφαρμόζει πολιτικές ελέγχου DMPs και θα επιτρέπει σε ανθρωπόμορφα ρομπότ να μάθουν και να αναπαράγουν πολλαπλά είδη χειρονομιών ύστερα από την επίδειξή τους από κάποιον άνθρωπο-εκπαιδευτή. Για την εκμάθηση θα γίνεται χρήση των καταγεγραμμένων κινήσεων του σώματος του ανθρώπου-εκπαιδευτή, ενώ κατά την αναπαραγωγή τα ρομπότ θα είναι σε θέση να τροποποιήσουν τις επιδεικνυόμενες χειρονομίες, είτε χωρικά είτε χρονικά, ανάλογα με την περίπτωση.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας της ανωτέρω μεθόδου στην παρούσα εργασία θα επιλεγθούν διαφορετικές κατηγορίες χειρονομιών, ενώ για κάθε κατηγορία θα επιλεγθούν κάποιες βασικές και αντιπροσωπευτικές χειρονομίες για τις οποίες θα πραγματοποιηθούν πολλαπλές επιδείξεις και καταγραφές. Ύστερα από την επεξεργασία των καταγεγραμμένων δεδομένων θα εφαρμοστεί η μέθοδος εκμάθησης και θα πραγματοποιηθεί προσαρμογή των δεδομένων σε

κάποιο συγκεκριμένο ρομπότ. Έπειτα θα εκτελεστούν από αυτό οι χειρονομίες που διδάχθηκαν, είτε με τις παραμέτρους (χρονική και χωρική εξέλιξη της κίνησης) της επίδειξης είτε με διαφορετικές παραμέτρους.

Δευτερεύων στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία μιας υποτυπώδους βιβλιοθήκης χειρονομιών, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του προγράμματος BabyRobot, αλλά και από ανεξάρτητους ερευνητές στο πλαίσιο αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ. Η βιβλιοθήκη αυτή θα περιλαμβάνει παραδείγματα διαφόρων ειδών χειρονομιών που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων και θα εξαρτάται από τις διαστάσεις του σώματος του εκπαιδευτή και όχι από τις διαστάσεις και τις δυνατότητες του ρομπότ που θα εκτελέσει τις χειρονομίες.

1.5 Συνεισφορά της εργασίας

Παρότι βασίστηκε σε προϋπάρχουσα θεωρητική γνώση για την κωδικοποίηση και τη γενίκευση κινήσεων η παρούσα εργασία παρουσιάζει κάποιες πρωτοτυπίες σε σχέση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Οι περισσότερες εργασίες στον τομέα που χρησιμοποιούν DMPs εστιάζουν στη μελέτη ενός είδους χειρονομιών προκειμένου να επιδείξουν κάποια διαφοροποίηση ή κάποια βελτίωση σε σχέση με προηγούμενες έρευνες, ενώ στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια ενοποιημένη μέθοδος, η οποία είναι σε θέση να υποστηρίξει την εκπαίδευση διακριτών, περιοδικών και μεικτών (συνδυασμός διακριτών και περιοδικών) χειρονομιών που εκτελούνται από ένα χέρι, αλλά και ως ένα βαθμό την εκπαίδευση χειρονομιών που εκτελούνται από το συνδυασμό δύο χεριών. Η ενοποίηση της εκπαίδευσης των διαφόρων κατηγοριών χειρονομιών έγκειται στην κωδικοποίηση κάθε κατηγορίας από την ίδια μορφή δυναμικών συστημάτων, τα οποία τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να ανταπεξέλθουν στην εκάστοτε κατηγορία. Η μέθοδος αυτή είναι επίσης σε θέση να χρησιμοποιήσει μόνο μια ανθρώπινη επίδειξη μιας χειρονομίας για τη διδασκαλία της και να παράξει εύκολα μια γενικευμένη χειρονομία, η οποία θα έχει την ίδια μορφή, αλλά κάποια στοιχεία της, όπως η διάρκεια και το τελικό σημείο της, θα διαφοροποιούνται ανάλογα με την κατάσταση.

Στην παρούσα εργασία εξερευνάται επίσης η απόδοση της δυνατότητας στο ρομπότ να προσαρμόζει εν λειτουργία κάποιες επιπρόσθετες παραμέτρους των χειρονομιών του, όπως το συναίσθημα και η εκφραστικότητα, με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδοσης που επιτυγχάνεται ως προς συγκεκριμένα μετρήσιμα χαρακτηριστικά κοινωνικής αλληλεπίδρασης με τον άνθρωπο, όπως είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού προσοχής (attention) και συμμετοχικότητας (engagement) του ανθρώπου, κατά την αλληλεπίδραση του με το ρομπότ. Συγκεκριμένα, προτείνεται μια μέθοδος, η οποία κάνει χρήση των DMPs, διαφόρων επιδείξεων μιας χειρονομίας και μιας παραμέτρου σε ένα συνεχές διάστημα, ώστε να παράγει μια κίνηση η οποία θα εκφράζει επίσης την επιθυμητή πληροφορία στον επιθυμητό βαθμό. Η παράμετρος που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί στο ποσοστό έκφρασης της πρόσθετης πληροφορίας στις α-

ντίστοιχες επιδείξεις, το οποίο διαφέρει ανάμεσα στις επιδείξεις.

1.6 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια πέραν του εισαγωγικού.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η θεωρητική θεμελίωση της μεθόδου κωδικοποίησης και γενίκευσης κινήσεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί πολιτικές ελέγχου οι οποίες βασίζονται σε μη γραμμικά δυναμικά συστήματα και ονομάζονται Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις (Dynamic Movement Primitives (DMPs)).

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι μέθοδοι κωδικοποίησης και γενίκευσης που χρησιμοποιούνται για διάφορες κατηγορίες κινήσεων και βασίζονται σε DMPs. Προτείνονται επίσης κάποιες πρωτότυπες προσεγγίσεις για την κωδικοποίηση συγκεκριμένων περιορισμένων κατηγοριών κινήσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η πρακτική υλοποίηση των μεθόδων που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, οι διατάξεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή και την επεξεργασία των κινήσεων και η ρομποτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαραγωγή των κινήσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι καταγεγραμμένες τροχιές με τις γενικευμένες τροχιές για κάθε είδος κίνησης που εξετάστηκε.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση της παρούσας εργασίας και για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις (DMPs)

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η θεωρητική θεμελίωση της μεθόδου κωδικοποίησης και γενίκευσης κινήσεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Οι Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις (Dynamic Movement Primitives (DMPs)) είναι πολιτικές ελέγχου (control policies) κίνησης που βασίζονται σε μη γραμμικά δυναμικά συστήματα για να περιγράψουν την εξέλιξη μιας κίνησης και προτάθηκαν στα [9] και [10]. Πρόκειται για δευτέρας τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες εμπεριέχουν πληροφορίες για τη μορφή και την εξέλιξη μιας κίνησης. Στο [23] αναπτύχθηκαν εξισώσεις για την κωδικοποίηση και την αναπαραγωγή τόσο διακριτών όσο και περιοδικών κινήσεων. Διακριτές ονομάζονται οι κινήσεις, οι οποίες ξεκινούν από κάποιο σημείο, ακολουθούν κάποια τροχιά και καταλήγουν σε κάποιο άλλο σημείο, δίχως να επαναληφθούν, ενώ περιοδικές ονομάζονται οι κινήσεις, οι οποίες επαναλαμβάνονται τουλάχιστον μια φορά κατά την εξέλιξή τους και αποτελούν ταλαντώσεις σε διάφορους άξονες συντεταγμένων, έχοντας εν γένει διαφορετικά πλάτη και συχνότητες για κάθε άξονα.

2.1 DMPs για διακριτές κινήσεις

Για την αναπαραγωγή διακριτών κινήσεων ενός βαθμού ελευθερίας χρησιμοποιείται μια μεταβλητή y , η οποία μπορεί να συμβολίζει είτε τη γωνία κάποιας άρθρωσης είτε κάποια συντεταγμένη στο χώρο εργασίας, και το σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων (2.1)–(2.2) με σταθερούς συντελεστές

$$\tau \dot{z} = \alpha_z(\beta_z(g - y) - z) \quad (2.1)$$

$$\tau \dot{y} = z \quad (2.2)$$

όπου α_z και β_z είναι σταθερές χρόνου και τ είναι ένας συντελεστής χρονικής κλιμάκωσης ο οποίος καθορίζει τη διάρκεια της κίνησης.

Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει τη σύγκλιση της μεταβλητής y στην τιμή g , αρκεί να ισχύει $\tau > 0$ και το σύστημα να είναι κρίσιμα αποσβέσιμο, δηλαδή να ισχύει $\alpha_z = 4\beta_z$. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για την υλοποίηση διακριτών κινήσεων από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Γίνεται εύκολα όμως αντιληπτό ότι για αυτή τη μορφή των εξισώσεων (2.1)–(2.2), το σύνολο των δυνατών τροχιών που μπορούν να αναπαραχθούν είναι αρκετά περιορισμένο. Για να είναι το σύστημα σε θέση να αναπαράγει μεγαλύτερο σύνολο τροχιών από κάποιο σημείο σε κάποιο άλλο, θα πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα η εξίσωση (2.1). Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται προσθέτοντας στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης (2.1) ένα μη γραμμικό όρο f .

Η συνάρτηση f ορίζεται ως ένας γραμμικός συνδυασμός N ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis functions) $\Psi_i(x)$ ([20]) με βάση την εξίσωση

$$f(x, g, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x)} x(g - y_0) \quad , \quad \Psi_i(x) = \exp(-h_i(x - c_i)^2) \quad (2.3)$$

όπου y_0 και g το αρχικό και το τελικό σημείο της τροχιάς αντίστοιχα και c_i και h_i το κέντρο και το εύρος της ακτινικής συνάρτησης βάσης $\Psi_i(x)$ αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις βάσης που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως Γκαουσιανές συναρτήσεις βάσης (Gaussian basis functions), αν και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλης μορφής συναρτήσεις.

Η εξίσωση (2.3) προέρχεται από το [20] και όχι από το [23] όπως οι υπόλοιπες, καθώς στο πρώτο η παραγόμενη τροχιά αποτελεί απλή κλιμάκωση μιας καταγεγραμμένης τροχιάς, όπως φαίνεται και από τον παράγοντα $(g - y_0)$, ενώ στο τελευταίο ακολουθείται διαφορετική μέθοδος παραγωγής μιας νέας τροχιάς, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν της πολλαπλές καταγεγραμμένες τροχιές.

Η μεταβλητή φάσης x χρησιμοποιείται για να εξουδετερώσει την άμεση εξάρτηση της συνάρτησης f από το χρόνο και ορίζεται από την εξίσωση

$$\tau \dot{x} = -\alpha_x x \quad (2.4)$$

η οποία καλείται **κανονικό σύστημα (canonical system)**. Θέτοντας ως αρχική συνθήκη $x(0) = 1$ στην εξίσωση (2.4) προκύπτει

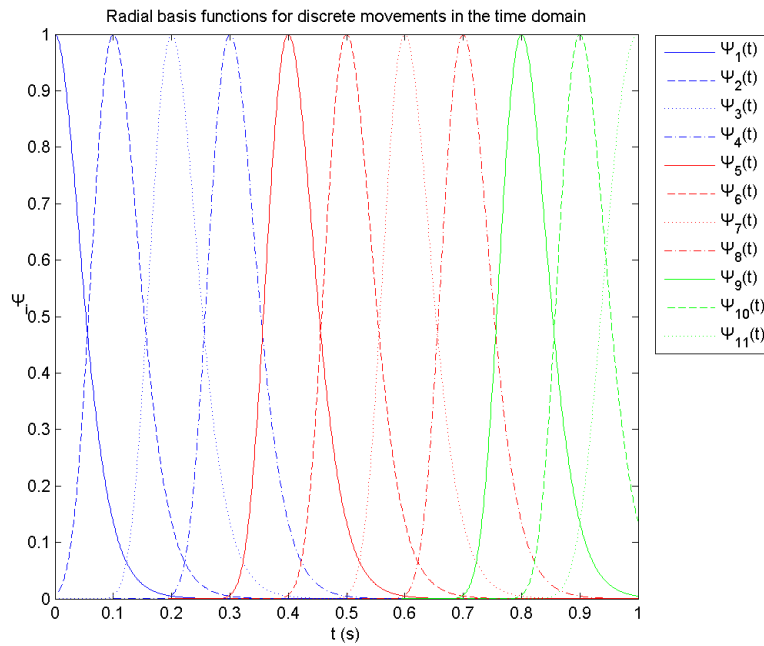
$$x(t) = \exp(-\alpha_x t / \tau) \quad , \quad (2.5)$$

όπου α_x μια προεπιλεγμένη σταθερά. Η μεταβλητή x ξεκινά από την τιμή 1 στην αρχή της κίνησης και φθίνοντας μονότονα συγκλίνει στην τιμή 0 με την πάροδο του χρόνου και η σταθερά α_x καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης της μεταβλητής x στην τιμή 0.

Το κέντρο c_i και το εύρος h_i μιας ακτινικής συνάρτησης βάσης $\Psi_i(x)$ για δεδομένο πλήθος συναρτήσεων N , ορίζονται σύμφωνα με το [23] ως

$$c_i = \exp\left(-\alpha_x \frac{i-1}{N-1}\right) \quad , \quad h_i = \frac{2}{(c_{i+1} - c_i)^2} \quad \text{και} \quad h_N = h_{N-1} \quad \text{για} \quad i = 1, \dots, N \quad . \quad (2.6)$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση (2.6) με την εξίσωση (2.5) φαίνεται ότι τα κέντρα c_i των ακτινικών συναρτήσεων βάσης είναι ισοκατανεμημένα στο πεδίο του χρόνου, με το πρώτο ($i = 1$) να βρίσκεται στην αρχή της κίνησης ($t = 0$) και το τελευταίο ($i = N$) να βρίσκεται στο τέλος αυτής ($t = \tau$). Φαίνεται επίσης πως έχουν όλες (με εξαίρεση την περίπτωση όπου $i = N$) το ίδιο πλάτος στο πεδίο του χρόνου. Η μορφή των εξισώσεων αυτών φαίνεται για $N = 11$ στο πεδίο του χρόνου t και στο πεδίο της μεταβλητής x στα Σχήματα 2.1 και 2.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1: Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για διακριτές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσει του χρόνου για $\tau = 1$

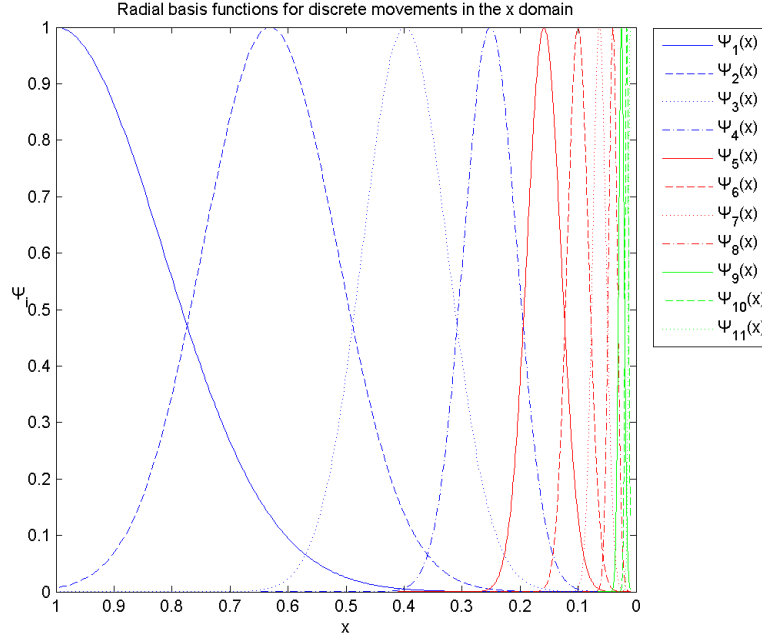
Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων

$$\tau \dot{z} = \alpha_z (\beta_z (g - y) - z) + f(x) \quad (2.7)$$

$$\tau \dot{y} = z \quad (2.8)$$

το οποίο καλείται **σύστημα μετασχηματισμού (transformation system)** και μπορεί ισοδύναμα να πάρει τη μορφή της διαφορικής εξίσωσης δευτέρας τάξης

$$\tau^2 \ddot{y} + \alpha_z \tau \dot{y} - \alpha_z \beta_z (g - y) = f(x) \quad . \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.2: Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για διακριτές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσεις της μεταβλητής φάσης x για $\alpha_x = 4.6$ και $\tau = 1$

Στο [18] παρουσιάζεται μια εναλλακτική μορφή συστήματος μετασχηματισμού για τις διακριτές κινήσεις, όπου η συνάρτηση f εισάγεται στην εξίσωση (2.8) και όχι στην (2.7), αλλά η παρούσα εργασία ακολουθεί το παράδειγμα μεταγενέστερων εργασιών, στην πλειονότητα των οποίων, η συνάρτηση f εισάγεται στην εξίσωση (2.8).

Η γενική λύση του συστήματος (2.7)–(2.8), για $a_z = 4b_z$, δίνεται από την εξίσωση

$$y(t) = e^{-\frac{2b_z t}{\tau}} \left[c_2 - \frac{1}{\tau^2} \int_0^t x e^{\frac{2b_z x}{\tau}} (4gb_z^2 + f(x)) dx + c_3 t + \frac{1}{\tau^2} t \int_0^t e^{\frac{2b_z x}{\tau}} (4gb_z^2 + f(x)) dx \right], \quad (2.10)$$

όπου c_2 και c_3 σταθερές που διαμορφώνονται ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες.

Δεδομένων των αρχικών συνθηκών $y(0) = y_0$ και $\dot{y}(0) = 0$, η εξίσωση (2.10) μετασχηματίζεται στην εξίσωση

$$y(t) = \frac{1}{\tau^2} e^{-\frac{2b_z t}{\tau}} \left[- \int_0^t x e^{\frac{2b_z x}{\tau}} (4gb_z^2 + f(x)) dx + t \int_0^t e^{\frac{2b_z x}{\tau}} (4gb_z^2 + f(x)) dx + \tau^2 y_0 + 2b_z \tau y_0 t \right]. \quad (2.11)$$

Η επίδραση της συνάρτησης f στο σύστημα εξισώσεων (2.7)–(2.8) (και κατ' επέκταση στην εξίσωση (2.11)) εξαφανίζεται στο τέλος της κίνησης, εφόσον είναι ανάλογη της τιμής της x , όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.3).

Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (2.11) μετασχηματίζεται στην εξίσωση

$$y(t) = g - e^{-\frac{2b_z t}{\tau}}(g - y_0) - \frac{1}{\tau} 2b_z t e^{-\frac{2b_z t}{\tau}}(g - y_0) \quad . \quad (2.12)$$

Με την προσθήκη της συνάρτησης f , εισάγεται η επιθυμητή δυναμική στην κίνηση και διατηρείται η ασυμπτωτική σύγκλιση της μεταβλητής y στην τιμή g .

Το μοντέλο, όπως διαμορφώθηκε από τις εξισώσεις (2.3)–(2.8), είναι χρονικά κλιμακούμενο λόγω της σταθεράς τ . Εάν δηλαδή η τιμή τ αντικατασταθεί από την τιμή $c \cdot \tau$, τότε η χρονική διάρκεια της κίνησης θα πολλαπλασιαστεί κατά ένα συντελεστή c . Επιπλέον το μοντέλο αυτό είναι και χωρικά κλιμακούμενο λόγω της ποσότητας $(g - y_0)$ στην εξίσωση (2.3). Εάν δηλαδή η τιμή g αντικατασταθεί από την τιμή $c \cdot g$, τότε το σύστημα θα συγκλίνει στον ίδιο χρόνο, στη θέση $c \cdot g$, χωρίς όμως να αλλάξει η μορφή της κίνησης.

2.2 DMPs για περιοδικές κινήσεις

Οι περιοδικές κινήσεις που μπορούν να αναπαραχθούν έχουν τη μορφή ταλάντωσης, γύρω από μια κεντρική τιμή, με κάποιο πλάτος και κάποια συχνότητα.

Για την αναπαραγωγή περιοδικών κινήσεων ενός βαθμού ελευθερίας χρησιμοποιείται ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων παρόμοιο με το σύστημα (2.7)–(2.8). Στο νέο σύστημα αντί του όρου τ , ο οποίος καθορίζει τη διάρκεια της κίνησης στο σύστημα (2.7)–(2.8), χρησιμοποιείται ο όρος Ω , ο οποίος καθορίζει την κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης ([23]). Η αλλαγή αυτή γίνεται μέσω της σχέσης $\Omega = \frac{1}{\tau}$. Επιπλέον η συνάρτηση f μετατρέπεται σε

$$f(\phi, r) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Gamma_i(\phi)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi)} r \quad , \quad \Gamma_i(\phi) = \exp(h_i(\cos(\phi - c_i) - 1)) \quad (2.13)$$

όπου r το πλάτος της ταλάντωσης και c_i και h_i το κέντρο και το εύρος της ακτινικής συνάρτησης βάσης $\Gamma_i(\phi)$ αντίστοιχα.

Η μεταβλητή φάσης ϕ χρησιμοποιείται, όπως και η μεταβλητή x , για να εξουδετερώσει την άμεση εξάρτηση της συνάρτησης f από το χρόνο και ορίζεται από την εξίσωση

$$\dot{\phi} = \Omega \quad (2.14)$$

η οποία αποτελεί το **κανονικό σύστημα** των DMPs για περιοδικές κινήσεις. Θέτοντας ως αρχική συνθήκη $\phi(0) = 0$ στην εξίσωση (2.14) προκύπτει

$$\phi(t) = \Omega t. \quad (2.15)$$

Η μεταβλητή ϕ ξεκινά από την τιμή 0 στην αρχή της κίνησης και αυξάνεται μονότονα με την πάροδο του χρόνου. Από την εξίσωση (2.15) προκύπτει ότι, στο τέλος της N -οστής

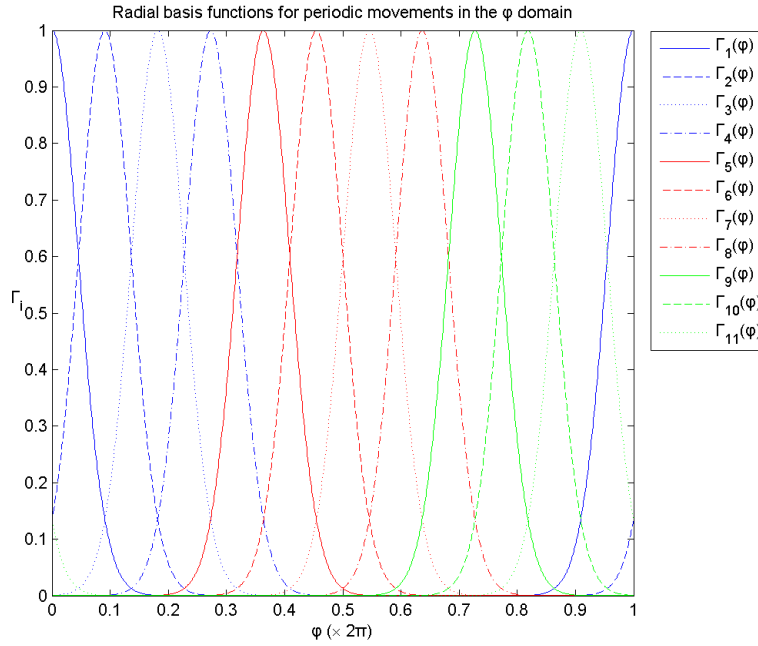
περιόδου της κίνησης, η μεταβλητή ϕ λαμβάνει την τιμή $2\pi N$.

Στα [14] και [6] παρουσιάζεται μια διαφορετική μορφή κανονικού συστήματος για τις περιοδικές κινήσεις, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της συχνότητας μιας περιοδικής κίνησης ενώ η κίνηση εκτελείται. Η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, καθώς η συχνότητα μιας περιοδικής κίνησης ενός ανθρώπινου χεριού δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μεταξύ συνεχόμενων περιόδων, ενώ ο υπολογισμός της συχνότητας με τη χρήση πολλαπλών περιόδων αποφέρει συνήθως σταθερότερα αποτελέσματα.

Το κέντρο c_i και το εύρος h_i μιας Ακτινικής συνάρτησης βάσης $\Gamma_i(\phi)$ για δεδομένο πλήθος συναρτήσεων N , ορίζονται σύμφωνα με το [7] ως

$$c_i = 2\pi \frac{i-1}{N} \quad \text{και} \quad h_i = 2,5N \quad \text{για} \quad i = 1, \dots, N \quad . \quad (2.16)$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση (2.16) με την εξίσωση (2.15) φαίνεται ότι τα κέντρα c_i των ακτινικών συναρτήσεων βάσης είναι ισοκαταναμημένα στο πεδίο της μεταβλητής ϕ , με το πρώτο ($i = 1$) να βρίσκεται στην αρχή της κίνησης ($\phi = 0$). Φαίνεται επίσης πως έχουν όλες το ίδιο πλάτος. Η μορφή των εξισώσεων αυτών φαίνεται για $N = 11$ στο πεδίο της μεταβλητής ϕ στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Ακτινικές συναρτήσεις βάσης για περιοδικές κινήσεις και για $N = 11$ συναρτήσεις της μεταβλητής φάσης ϕ για $\Omega = 2\pi$

Λόγω της εξίσωσης (2.15), η μορφή των ακτινικών συναρτήσεων βάσης Γ_i δεν διαφέρει από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της μεταβλητής ϕ για την πρώτη περίοδο της κίνησης.

Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων

$$\dot{z} = \Omega (\alpha_z (\beta_z (g - y) - z) + f(\phi)) \quad (2.17)$$

$$\dot{y} = \Omega z \quad (2.18)$$

όπου g το σημείο γύρω από το οποίο πραγματοποιείται η ταλάντωση ([8]). Το σύστημα των εξισώσεων (2.17)–(2.18) αποτελεί το **σύστημα μετασχηματισμού** των DMPs για περιοδικές κινήσεις και μπορεί ισοδύναμα να πάρει τη μορφή της διαφορικής εξίσωσης δευτέρας τάξης

$$\frac{1}{\Omega^2} \ddot{y} + \frac{\alpha_z}{\Omega} \dot{y} - \alpha_z \beta_z (g - y) = f(\phi) \quad . \quad (2.19)$$

Η λύση του συστήματος (2.17)–(2.18), για $a_z = 4b_z$, δίνεται από τις εξισώσεις (2.10)–(2.11) με αντικατάσταση των όρων τ και x από τους όρους $\frac{1}{\Omega}$ και ϕ αντίστοιχα.

2.3 DMPs για μεικτές κινήσεις

Εκτός από τις αυστηρά διακριτές και τις αυστηρά περιοδικές κινήσεις που εκτελούνται από ένα χέρι υπάρχουν και ορισμένες κινήσεις ενός χεριού οι οποίες δομούνται από την ταυτόχρονη εξέλιξη δύο επιμέρους κινήσεων, κάθε μια από τις οποίες μπορεί να είναι διακριτή ή περιοδική, για την επίτευξη κάποιου ιδιαίτερου στόχου. Οι κινήσεις αυτές καλούνται, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, **μεικτές κινήσεις** και είναι τεσσάρων ειδών, καθώς επιτρέπεται κάθε συνδυασμός διακριτών και περιοδικών κινήσεων.

Οι μεικτές κινήσεις ενός χεριού, όπως και οι κινήσεις που εκτελούνται από δύο χέρια, ανήκουν σε μια κατηγορία σύνθετων κινήσεων οι οποίες αποτελούνται από τις συγχρονισμένες κινήσεις πολλαπλών συντελεστών. Στην περίπτωση των μεικτών κινήσεων, ως συντελεστής θεωρείται κάθε μια από τις επιμέρους κινήσεις, ενώ στην περίπτωση των κινήσεων που εκτελούνται από δύο χέρια, ως συντελεστής θεωρείται κάθε ένα από τα χέρια. Σε τέτοιου είδους κινήσεις ένας από τους δύο συντελεστές λειτουργεί ως οδηγός (leader), είναι δηλαδή ανεξάρτητος και ορίζει το γενικότερο τοπίο της κίνησης και ο άλλος ως ακόλουθος (follower), εξαρτάται δηλαδή από την κατάσταση του οδηγού και επιτελεί μια επιμέρους λειτουργία, η οποία εξελίσσεται γύρω από το τοπίο που ορίζει ο οδηγός.

Για την κωδικοποίηση κινήσεων πολλαπλών συντελεστών προτείνονται στο [26] οι Πρωτογενείς Δυναμικές Κινήσεις Τροποποιημένων Συντεταγμένων (Coordinate Changed Dynamic Movement Primitives (CCDMPs)), οι οποίες αποτελούν επέκταση των απλών DMPs.

Τα CCDMPs αποτελούνται από δύο τμήματα, το DMP του οδηγού και το DMP του ακόλουθου. Το DMP του οδηγού ορίζεται στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων όπως στην

περίπτωση των απλών DMPs που περιγράφηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο.

Το σύστημα μετασχηματισμού του οδηγού για κάθε μια από τις τρεις μεταβλητές θέσης και κάθε μια από τις τρεις μεταβλητές προσανατολισμού δίνεται από τις εξισώσεις

$$\tau_l \cdot \dot{z}_l = \alpha_z(\beta_z(g_l - y_l) - z_l) + f_l \quad (2.20)$$

$$\tau_l \cdot \dot{y}_l = z_l \quad (2.21)$$

, όπου ο δείκτης l υποδηλώνει τα μεγέθη του οδηγού. Η μη γραμμική συνάρτηση f ορίζεται ακριβώς όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως στα τμήματα των διακριτών και των περιοδικών κινήσεων.

Η θέση και ο προσανατολισμός του οδηγού ορίζουν ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο ορίζεται το DMP του ακόλουθου. Η κωδικοποίηση του ακόλουθου στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του οδηγού εγγυάται τη διατήρηση της συμπεριφοράς του ακόλουθου ως προς τον οδηγό, ανεξάρτητα από την κατάσταση του οδηγού. Το σύστημα μετασχηματισμού του ακόλουθου ορίζεται μόνο για τις τρεις μεταβλητές θέσης στο τοπικό σύστημα. Οι μεταβλητές προσανατολισμού στο τοπικό σύστημα είναι σταθερές και ορίζονται ανάλογα με την επιθυμητή σχέση οδηγού-ακόλουθου. Η μετάβαση από το καθολικό στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων γίνεται μέσω του πολλαπλασιασμού του συστήματος μετασχηματισμού για τα απλά DMPs με την ομογενή μήτρα μετασχηματισμού R_G^L . Το σύστημα μετασχηματισμού του ακόλουθου δίνεται έτσι σε διανυσματική μορφή από τις εξισώσεις

$$\tau_f \cdot R_G^L \cdot \dot{z}_f^G = R_G^L \cdot (\alpha_z(\beta_z(g_f^G - y_f^G) - z_f^G) + f_f^G) \quad (2.22)$$

$$\tau_f \cdot R_G^L \cdot \dot{y}_f^G = R_G^L \cdot z_f^G \quad (2.23)$$

, όπου ο δείκτης f υποδηλώνει τα μεγέθη του ακόλουθου, ενώ οι δείκτες G και L το καθολικό και το τοπικό σύστημα συντεταγμένων αντίστοιχα. Με y_f^G και z_f^G συμβολίζονται τα ομογενή διανύσματα θέσης και ταχύτητας αντίστοιχα του ακόλουθου στο καθολικό σύστημα. Το διάνυσμα θέσης έχει μοναδιαίο τέταρτο στοιχείο, ενώ τα διανύσματα ταχύτητας και επιτάχυνσης έχουν μηδενικά τέταρτα στοιχεία.

Οι ποσότητες g_f^G και f_f^G εξαρτώνται πάντα από την κατάσταση του οδηγού, η οποία είναι εν γένει άγνωστη στον ακόλουθο, και είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Οι ποσότητες $g_f^L = R_G^L \cdot g_f^G$ και $f_f^L = R_G^L \cdot f_f^G$ όμως αφορούν την κίνηση του ακόλουθου στο τοπικό σύστημα και υπολογίζονται εύκολα από αυτήν. Αντικαθιστώντας τις ποσότητες αυτές στις εξισώσεις (2.22)–(2.23) λαμβάνονται οι ακόλουθες εξισώσεις

$$\tau_f \cdot R_G^L \cdot \dot{z}_f^G = \alpha_z(\beta_z(g_f^L - R_G^L \cdot y_f^G) - R_G^L \cdot z_f^G) + f_f^L \quad (2.24)$$

$$\tau_f \cdot R_G^L \cdot \dot{y}_f^G = R_G^L \cdot z_f^G \quad (2.25)$$

Τα συστήματα μετασχηματισμού που παρουσιάστηκαν, τόσο για τον οδηγό όσο και για τον ακόλουθο, αφορούν διακριτές κινήσεις. Για την κωδικοποίηση περιοδικών κινήσεων οι όροι τ_l και τ_f αντικαθίστανται από τους όρους $\frac{1}{\Omega_l}$ και $\frac{1}{\Omega_f}$ αντίστοιχα.

Οι μη γραμμικές συναρτήσεις f στην περίπτωση του οδηγού ορίζονται ακριβώς όπως στις απλές διακριτές και περιοδικές κινήσεις. Στην περίπτωση του ακόλουθου όμως μετατρέπονται στις

$$f_f^L(x, g, y_0) = R_G^L \cdot \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x)} x (g_f^G - y_{0,f}^G) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x)} x (g_f^L - y_{0,f}^L) \quad (2.26)$$

$$f_f^L(\phi, r) = R_G^L \cdot \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Gamma_i(\phi)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi)} r_f^G = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Gamma_i(\phi)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi)} r_f^L \quad (2.27)$$

για διακριτές και περιοδικές κινήσεις αντίστοιχα.

Οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης $\Psi_i(x)$ και $\Gamma_i(\phi)$, τα κέντρα τους c_i και τα εύρη τους h_i ορίζονται ακριβώς όπως στην περίπτωση των απλών διακριτών και περιοδικών κινήσεων αντίστοιχα, τόσο για τον οδηγό όσο και για τον ακόλουθο.

Τα κανονικά συστήματα του οδηγού και του ακόλουθου δίνονται από τις εξισώσεις

$$\tau_{l,f} \cdot \dot{x}_{l,f} = -\alpha_x \cdot x_{l,f} \quad (2.28)$$

$$\dot{\phi}_{l,f} = \Omega_{l,f} \quad (2.29)$$

για διακριτές και περιοδικές κινήσεις αντίστοιχα.

Ο οδηγός και ο ακόλουθος έχουν ξεχωριστά κανονικά συστήματα, καθώς επιτρέπεται να υλοποιούν διαφορετικού είδους κίνηση. Ο συγχρονισμός των δύο κινήσεων καθορίζεται από το λόγο των συντελεστών χρονικής κλιμάκωσης $\frac{\tau_f}{\tau_l}$.

2.4 Όροι Σύζευξης (Coupling Terms)

Σε ορισμένες περιπτώσεις κινήσεων είναι επιθυμητή η τροποποίηση της τροχιάς που έχει διδαχθεί, με βάση τις τιμές κάποιων παραμέτρων του περιβάλλοντος της κίνησης, ώστε να επιτευχθεί κάποιος δευτερεύων στόχος, να προστεθεί μια άλλη διάσταση στην κίνηση ή για

κάποιο άλλο λόγο. Οι κινήσεις που έχουν υποστεί αυτού του είδους τις τροποποιήσεις καλούνται, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, παραμετροποιημένες κινήσεις.

Προκειμένου να μπορούν να κωδικοποιηθούν οι ανωτέρω τροποποιήσεις από το μοντέλο των DMPs χρησιμοποιούνται κάποιες πρόσθετες συναρτήσεις στο σύστημα μετασχηματισμού. Οι συναρτήσεις αυτές καλούνται “Όροι Σύζευξης” (Coupling Terms (CTs)) και δρουν παράλληλα με τις συναρτήσεις f , που περιγράφηκαν σε προηγούμενα τμήματα του κεφαλαίου, για τη διαμόρφωση της τροχιάς της κίνησης ([20]).

Με την εισαγωγή των CTs, το σύστημα μετασχηματισμού του μοντέλου των DMPs (εξισώσεις (2.7)–(2.8)) μετασχηματίζεται σε

$$\tau \dot{z} = \alpha_z(\beta_z(g - y) - z) + f(x) + C_t \quad (2.30)$$

$$\tau \dot{y} = z \quad (2.31)$$

Ο όρος C_t έχει μηδενική τιμή εκτός αν οι συνθήκες του περιβάλλοντος επιβάλλουν την ενεργοποίησή του.

Η μορφή του όρου C_t ποικίλει αρκετά, καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιθυμητή συμπεριφορά που εκφράζεται μέσω αυτού. Στα [15] και [13], για παράδειγμα, υλοποιείται ένας CT, ο οποίος έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για την περίπτωση αποφυγής εμποδίων και έχει αυστηρή μαθηματική έκφραση. Στην περίπτωση αυτή, η παράμετρος του περιβάλλοντος της κίνησης που χρησιμοποιεί ο CT είναι η θέση του εμποδίου. Υπάρχουν όμως και υλοποιήσεις στις οποίες προτείνονται γενικευμένες μορφές των CTs, με στόχο τη χρήση της ίδιας υλοποίησης για την αντιμετώπιση διαφορετικών καταστάσεων. Στο [16], για παράδειγμα, προτείνεται μια μέθοδος εκμάθησης CTs με βάση την επίδειξη της επιθυμητής κίνησης, τόσο για τις περιπτώσεις όπου εκφράζεται η επιθυμητή συμπεριφορά, όσο και για τις περιπτώσεις όπου αυτή δεν εκφράζεται.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή Μεθοδολογίας Εκπαίδευσης Ρομποτικών Χειρονομιών βάσει Επίδειξης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μέθοδος που επιλέχθηκε για την εκμάθηση κάθε κατηγορίας κινήσεων και ακολουθείται στην παρούσα εργασία. Αρχικά εξετάζονται οι κατηγορίες διακριτών και περιοδικών κινήσεων που εκτελούνται από ένα χέρι. Στη συνέχεια εξετάζονται η κατηγορία κινήσεων που εκτελούνται από ένα χέρι αλλά αποτελούνται από ένα διακριτό και ένα περιοδικό τμήμα και η κατηγορία κινήσεων που εκτελούνται από δύο χέρια. Για κάθε κατηγορία περιγράφεται η διαδικασία διδασκαλίας μιας κίνησης η οποία χρησιμοποιεί δεδομένα που εξήχθησαν από κάποιες επιδείξεις της κίνησης αυτής για τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων. Έπειτα περιγράφεται η διαδικασία γενίκευσης της δεδομένης κίνησης η οποία χρησιμοποιεί τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν κατά τη διδασκαλία αλλά και ορισμένες παραμέτρους που εισάγονται από το χρήστη και σχετίζονται με την επιθυμητή γενίκευση της κίνησης. Τέλος γίνεται μια προσπάθεια παραμετροποίησης μιας δεδομένης κίνησης με τη χρήση ενός αριθμού επιδείξεων της και μιας συνεχούς μεταβλητής με στόχο την απόδοση μιας περαιτέρω έννοιας στην κίνηση.

Για την αναπαραγωγή κινήσεων (είτε διακριτών είτε περιοδικών) N βαθμών ελευθερίας, όπως για παράδειγμα η κίνηση ενός ανθρώπινου βραχίονα, ο οποίος έχει επτά μείζονες βαθμούς ελευθερίας, χρησιμοποιούνται N διαφορετικά συστήματα μετασχηματισμού, με τις ίδιες παραμέτρους τ , α_z και β_z , αλλά με διαφορετικά σημεία έλξης g και πλάτη ταλάντωσης r , παράγοντας έτσι N διαφορετικές μη γραμμικές συναρτήσεις f . Ο συγχρονισμός των N βαθμών ελευθερίας επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κανονικού συστήματος, το οποίο είναι κοινό για όλους ([20], [7]). Με τον τρόπο αυτό παράγονται N συγχρονισμένες χρονοσειρές, μια για κάθε βαθμό ελευθερίας, οι οποίες περιγράφουν την επιθυμητή κίνηση. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση που γίνεται στο κεφάλαιο αφορά μονάχα ένα βαθμό ελευθερίας.

3.1 Διακριτές κινήσεις ενός χεριού

3.1.1 Διδασκαλία

Κατά τη διδασκαλία των διακριτών κινήσεων, στόχος είναι ο προσδιορισμός των βαρών w_i της εξίσωσης (2.3).

Αρχικά εξάγονται οι παράμετροι μιας επίδειξης μιας κίνησης για κάθε μια από τις έξι μεταβλητές που περιγράφουν την κίνηση αυτή, δηλαδή:

- οι ποσότητες $y_d(t_j)$, $\dot{y}_d(t_j)$ και $\ddot{y}_d(t_j)$, όπου $y_d(t_j)$ η τιμή μιας από τις καταγεγραμμένες μεταβλητές τη χρονική στιγμή t_j , με $j \in (1, \dots, T)$
- η σταθερά χρόνου τ , η οποία ορίζεται ως $\tau = t_T$, όπου t_T η διάρκεια της κίνησης
- το σημείο έλξης g , το οποίο ορίζεται ως $g = y_d(t_T)$
- το σημείο αρχής y_0 , το οποίο ορίζεται ως $y_0 = y_d(t_1)$

Με βάση τις εξισώσεις (2.5), (2.3) και (2.6) υπολογίζονται οι ποσότητες $x_j (= x(t_j))$ και $\Psi_i(x_j)$ για $i = 1, \dots, N$ και $j = 1, \dots, T$.

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2.9) και χρησιμοποιώντας τις ποσότητες $y_d(t_j)$, $\dot{y}_d(t_j)$ και $\ddot{y}_d(t_j)$ υπολογίζονται οι τιμές $f(t_j)$ για $j \in (1, \dots, T)$ και δομείται το διάνυσμα

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(t_1) \\ \vdots \\ f(t_T) \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Ορίζοντας τον πίνακα

$$\mathbf{X} = (g - y_d(t_1)) \begin{bmatrix} \frac{\Psi_1(x_1)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x_1)} x_1 & \cdots & \frac{\Psi_N(x_1)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x_1)} x_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Psi_1(x_T)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x_T)} x_T & \cdots & \frac{\Psi_N(x_T)}{\sum_{i=1}^N \Psi_i(x_T)} x_T \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

και το διάνυσμα

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

η εξίσωση (2.3) μετατρέπεται στο σύστημα γραμμικών εξισώσεων

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}\mathbf{w}. \quad (3.4)$$

Η λύση του συστήματος (3.4) υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως

$$\mathbf{w} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{f}. \quad (3.5)$$

Στο σημείο αυτό έχουν υπολογιστεί τα βάρη w_i και το στάδιο της διδασκαλίας μπορεί να τερματιστεί, καθώς το πλαίσιο των DMPs που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο επιτρέπει τη γενίκευση κάποιας κίνησης με τη χρήση μόνο μιας επίδειξης.

3.1.2 Γενίκευση

Κατά τη γενίκευση των διακριτών κινήσεων, ο στόχος είναι η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.7)–(2.8) προς εύρεση της τροχιάς $y(t_k)$, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κινήσεις που έχουν διδαχθεί και τις επιθυμητές παραμέτρους της κίνησης, δηλαδή τη διάρκεια της $\tau = t_T$, το σημείο αρχής της y_0 και το σημείο έλξης g .

Αρχικά δομείται το σύνολο των χρονικών στιγμών t_k , το οποίο ξεκινά από $t_1 = 0$ και καταλήγει σε $t_T = \tau$ που ισούται με την επιθυμητή διάρκεια της κίνησης. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις εξισώσεις (2.5), (2.3) και (2.6) δομείται το σύνολο $x_k (= x(t_k))$ και οι συναρτήσεις $\Psi_i(x_k)$ για $i = 1, \dots, N$ και $k = 1, \dots, T$.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα βάρη w_i που έχουν διδαχθεί για τη συγκεκριμένη κίνηση, μαζί με τα υπολογισμένα x_k , $\Psi_i(x_k)$ και τα δοσμένα g και y_0 και υπολογίζονται οι τιμές $f(t_k)$, σύμφωνα με την εξίσωση (2.3). Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται με τη σειρά τους στην επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.7)–(2.8) προς εύρεση των τιμών $y(t_k)$.

3.2 Περιοδικές κινήσεις ενός χεριού

3.2.1 Διδασκαλία

Η διδασκαλία των περιοδικών κινήσεων πραγματοποιείται με τρόπο ανάλογο προς τη διδασκαλία διακριτών κινήσεων. Κατά τη διδασκαλία των περιοδικών κινήσεων, στόχος είναι ο προσδιορισμός των βαρών w_i της εξίσωσης (2.13).

Αρχικά εξάγονται οι παράμετροι μιας κίνησης για κάθε μια από τις έξι μεταβλητές που περιγράφουν την κίνηση αυτή, δηλαδή :

- οι ποσότητες $y_d(t_j)$, $\dot{y}_d(t_j)$ και $\ddot{y}_d(t_j)$, όπου $y_d(t_j)$ η τιμή μιας από τις καταγεγραμμένες μεταβλητές τη χρονική στιγμή t_j , με $j \in (1, \dots, T)$
- η σταθερά συχνότητας $\Omega = 2\pi F$, όπου F η συχνότητα της ταλάντωσης, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη κορυφή του φάσματος ισχύος της μεταβλητής y_d
- το κέντρο της ταλάντωσης g , το οποίο ορίζεται ως $g = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T y_d(t_j)$

- το πλάτος της ταλάντωσης r , το οποίο ορίζεται ως $r = \frac{1}{2}(y_{d,max} - y_{d,min})$, όπου $y_{d,max}$ και $y_{d,min}$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η μεταβλητή y_d κατά τη διάρκεια της κίνησης αντίστοιχα
- το σημείο αρχής y_0 , το οποίο ορίζεται ως $y_0 = y_d(t_1)$

Στο ανθρώπινο μυοσκελετικό σύστημα οι διάφοροι βαθμοί ελευθερίας είναι συζευγμένοι, οπότε κατά την εκτέλεση μιας περιοδικής κίνησης ο λόγος των συχνοτήτων δύο βαθμών ελευθερίας είναι ρητός αριθμός. Για το λόγο αυτό ως συχνότητα Ω της περιοδικής κίνησης επιλέγεται η μικρότερη από τις συχνότητες των επιμέρους ταλαντώσεων των διάφορων βαθμών ελευθερίας και είναι εκείνη που χρησιμοποιείται στο κοινό κανονικό σύστημα της εξίσωσης (2.15) ([7]).

Με βάση τις εξισώσεις (2.15), (2.13) και (2.16) υπολογίζονται οι ποσότητες $\phi_j (= \phi(t_j))$ και $\Gamma_i(\phi_j)$ για $i = 1, \dots, N$ και $j = 1, \dots, T$.

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2.19) και χρησιμοποιώντας τις ποσότητες $y_d(t_j)$, $\dot{y}_d(t_j)$ και $\ddot{y}_d(t_j)$ υπολογίζονται οι τιμές $f(t_j)$ για $j \in (1, \dots, T)$ και δομείται το διάνυσμα

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(t_1) \\ \vdots \\ f(t_T) \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Ορίζοντας τον πίνακα

$$\mathbf{X} = r \begin{bmatrix} \frac{\Gamma_1(\phi_1)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi_1)} & \cdots & \frac{\Gamma_N(\phi_1)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Gamma_1(\phi_T)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi_T)} & \cdots & \frac{\Gamma_N(\phi_T)}{\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\phi_T)} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

και το διάνυσμα

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

η εξίσωση (2.13) μετατρέπεται στο σύστημα γραμμικών εξισώσεων

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}\mathbf{w}. \quad (3.4)$$

Η λύση του συστήματος (3.4) υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως

$$\mathbf{w} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{f}. \quad (3.5)$$

Κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης f , ενδέχεται να παρουσιαστούν αποκλίσεις μεταξύ των τιμών της που αντιστοιχούν στην ίδια τιμή της μεταβλητής φάσης ϕ για διαφορετικές όμως περιόδους, κατά την αρχή και το πέρας της κίνησης. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις μεταβάσεις από την ακινησία στην ταλάντωση και από την ταλάντωση στην ακινησία αντίστοιχα. Για να μην επηρεαστεί η συνολική μορφή της συνάρτησης f , άρα και της τροχιάς της ταλάντωσης, από αυτές τις αποκλίσεις κρίνεται ωφέλιμη η διαγραφή τους, όπως επίσης και η διαγραφή των τιμών της μεταβλητής ϕ και των συναρτήσεων Γ_i που αντιστοιχούν σε αυτές. Ύστερα από αυτή τη διαδικασία υπολογίζονται εκ νέου ο πίνακας \mathbf{X} και τα διανύσματα \mathbf{f} και \mathbf{w} .

Στο σημείο αυτό έχουν υπολογιστεί τα βάρη w_i και το στάδιο της διαδικασίας μπορεί να τερματιστεί, καθώς το πλαίσιο των DMPs που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο επιτρέπει τη γενίκευση κάποιας κίνησης με τη χρήση μόνο μιας επίδειξης.

3.2.2 Γενίκευση

Η γενίκευση των περιοδικών κινήσεων πραγματοποιείται με τρόπο ανάλογο προς την αναπαγωγή διακριτών κινήσεων. Κατά την αναπαγωγή των περιοδικών κινήσεων, ο στόχος είναι η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.17)–(2.18) προς εύρεση της τροχιάς $y(t_k)$, λαμβάνοντας υπό όψιν τις κινήσεις που έχουν διδαχθεί και τις επιθυμητές παραμέτρους της κίνησης, δηλαδή τη συχνότητα της Ω , τον αριθμό των ταλαντώσεων n , το σημείο αρχής της y_0 , το κέντρο της ταλάντωσης g και το πλάτος της r . Ο αριθμός n δεν είναι απαραίτητο να είναι ακέραιος. Στην περίπτωση που δεν είναι, το δεκαδικό τμήμα του καθορίζει το ποσοστό στο οποίο υλοποιείται η τελευταία ταλάντωση.

Αρχικά δομείται το σύνολο των χρονικών στιγμών t_k , το οποίο ξεκινά από $t_1 = 0$ και καταλήγει σε $t_T = n \cdot \frac{2\pi}{\Omega}$ που ισούται με την επιθυμητή διάρκεια της ταλάντωσης. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις εξισώσεις (2.15), (2.13) και (2.16) δομείται το σύνολο $\phi_k (= \phi(t_k))$ και οι συναρτήσεις $\Gamma_i(\phi_k)$ για $i = 1, \dots, N$ και $k = 1, \dots, T$.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα βάρη w_i που έχουν διδαχθεί για τη συγκεκριμένη κίνηση, μαζί με τα υπολογισμένα ϕ_k , $\Gamma_i(\phi_k)$ και το δοσμένο r και υπολογίζονται οι τιμές $f(t_k)$, σύμφωνα με την εξίσωση (2.13). Οι τιμές αυτές της f αφορούν μόνο την περιοδική φάση της κίνησης. Προκειμένου να σταματήσει η κίνηση με ομαλό τρόπο, οι τιμές της f που αντιστοιχούν στην τελευταία περίοδο της, δηλαδή από τη χρονική στιγμή $t_{T_0} = (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{\Omega}$ έως τη χρονική στιγμή $t_T = n \cdot \frac{2\pi}{\Omega}$, πολλαπλασιάζονται με την ποσότητα $\exp(-\alpha_x \frac{\Omega}{2\pi} t)$. Η ποσότητα αυτή χρησιμοποιείται, όπως και στις διακριτές κινήσεις, ώστε η συνάρτηση f να συγκλίνει ασυμπτωτικά στην τιμή μηδέν με συνεχή και ομαλό τρόπο και να αποφευχθούν ανεπιθύμητα άλματα στην υπολογιζόμενη επιτάχυνση της γενικευμένης κίνησης. Η περίοδος από τη χρονική στιγμή t_{T_0} έως τη χρονική στιγμή t_T αποτελεί τη φθίνουσα φάση της κίνησης.

Οι τελικές αυτές τιμές της f χρησιμοποιούνται με τη σειρά τους στην επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.17)–(2.18) προς εύρεση των τιμών $y(t_k)$.

3.3 Μεικτές κινήσεις ενός χεριού

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 υπάρχουν τεσσάρων ειδών μεικτές κινήσεις ενός χεριού. Χάριν απλότητας και για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας περιγράφεται η διδασκαλία και η γενίκευση μόνο για την περίπτωση της μεικτής κίνησης που αποτελείται από ένα διακριτό και ένα περιοδικό τμήμα, με το διακριτό τμήμα να λειτουργεί ως οδηγός και το περιοδικό ως ακόλουθος. Οι υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με παρόμοιο σκεπτικό, δεδομένης της ανάλυσης που ακολουθεί και των εξισώσεων του Κεφαλαίου 2.

3.3.1 Διδασκαλία

Κατά τη διδασκαλία των μεικτών κινήσεων, στόχος είναι ο διαχωρισμός της κίνησης σε διακριτό και περιοδικό τμήμα και ο προσδιορισμός των βαρών w_i των εξισώσεων (2.3) και (2.27) αντίστοιχα σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής στο Κεφάλαιο αυτό, αλλά και στο Κεφάλαιο 2.

3.3.1.1 Διαχωρισμός τμημάτων κίνησης

Αρχικά εξάγονται οι παράμετροι μιας επίδειξης μιας μεικτής κίνησης για κάθε μια από τις έξι μεταβλητές που περιγράφουν την κίνηση αυτή, δηλαδή:

- οι ποσότητες $y_{d,m}(t_j)$, $\dot{y}_{d,m}(t_j)$ και $\ddot{y}_{d,m}(t_j)$, όπου $y_{d,m}(t_j)$ η τιμή μιας από τις καταγεγραμμένες μεταβλητές της μεικτής κίνησης τη χρονική στιγμή t_j , με $j \in (1, \dots, T)$
- η σταθερά χρόνου τ , η οποία ορίζεται ως $\tau = t_T$, όπου t_T η διάρκεια της κίνησης
- η σταθερά συχνότητας $\Omega = 2\pi F$, όπου F η συχνότητα της ταλάντωσης του περιοδικού τμήματος, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη κορυφή του φάσματος ισχύος της μεταβλητής $y_{d,m}$

Η συχνότητα Ω επιλέγεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση των απλών περιοδικών κινήσεων και είναι κοινή για όλους τους βαθμούς ελευθερίας.

Στη συνέχεια, κάθε μεταβλητή θέσης φιλτράρεται χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο κινούμενου μέσου. Το μήκος του παραθύρου φιλτραρίσματος $m (= 2n + 1)$ αντιστοιχεί στην περίοδο του περιοδικού τμήματος και υπολογίζεται με βάση τη συχνότητα Ω ως $m = 2 \lfloor \frac{\pi F_s}{\Omega} \rfloor + 1$, όπου F_s η συχνότητα δειγματοληψίας της ποσότητας $y_{d,m}$. Για να είναι όμως δυνατός ο υπολογισμός

της εξόδου του φίλτρου για τις πρώτες και τις τελευταίες n τιμές της χρονοσειράς $y_{d,m}$ είναι απαραίτητη η επαύξηση (padding) της χρονοσειράς $y_{d,m}$ με n φορές την αρχική της τιμή στην αρχή και με n φορές την τελική της τιμή στο τέλος, πριν χρησιμοποιηθεί το φίλτρο. Η διαδικασία αυτή εισάγει βέβαια κάποιο σφάλμα, καθώς δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματική κίνηση, αλλά το σφάλμα αυτό δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την εξέλιξη της κίνησης και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Η έξοδος του φίλτρου κινούμενου μέσου αποτελεί μια καλή προσέγγιση του διακριτού τμήματος της κίνησης $y_{d,d}$. Αφαιρώντας την έξοδο του φίλτρου από την αρχική χρονοσειρά λαμβάνεται μια καλή προσέγγιση του περιοδικού τμήματος της κίνησης $y_{d,p}$. Ισχύει δηλαδή

$$y_{d,d}(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=j-n}^{k=j+n} y_{d,m}(t_k) \quad (3.7)$$

και

$$y_{d,p}(t_j) = y_{d,m}(t_j) - y_{d,d}(t_j) \quad (3.8)$$

Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και για την ταχύτητα $\dot{y}_{d,m}$ και την επιτάχυνση $\ddot{y}_{d,m}$ που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή θέσης.

Για το διακριτό τμήμα της κίνησης, ως μεταβλητές προσανατολισμού επιλέγονται οι μεταβλητές προσανατολισμού της μεικτής κίνησης χωρίς κάποια τροποποίηση. Για το περιοδικό τμήμα της κίνησης ο προσανατολισμός δεν λαμβάνεται υπ' όψιν.

Ύστερα από το διαχωρισμό των τμημάτων της κίνησης υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι της κίνησης για κάθε μια από τις μεταβλητές που περιγράφουν κάθε τμήμα της.

Για το διακριτό τμήμα υπολογίζονται για τις τρεις μεταβλητές χώρου και για τις τρεις μεταβλητές προσανατολισμού:

- το σημείο έλξης g_d , το οποίο ορίζεται ως $g_d = y_{d,d}(t_T)$
- το σημείο αρχής $y_{0,d}$, το οποίο ορίζεται ως $y_{0,d} = y_{d,d}(t_1)$

Για το περιοδικό τμήμα υπολογίζονται για τις τρεις μεταβλητές χώρου:

- το κέντρο της ταλάντωσης g_p , το οποίο ορίζεται ως $g_p = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T y_{d,p}(t_j)$
- το πλάτος της ταλάντωσης r , το οποίο ορίζεται ως $r = \frac{1}{2}(y_{d,p,max} - y_{d,p,min})$, όπου $y_{d,p,max}$ και $y_{d,p,min}$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η μεταβλητή $y_{d,p}$ κατά τη διάρκεια της κίνησης αντίστοιχα
- το σημείο αρχής $y_{0,p}$, το οποίο ορίζεται ως $y_{0,p} = y_{d,p}(t_1)$

Στο σημείο αυτό τα δύο τμήματα της μεικτής κίνησης έχουν διαχωριστεί και το διακριτό τμήμα έχει οριστεί στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων, ενώ το περιοδικό τμήμα έχει οριστεί σε ένα κινούμενο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο έχει τον ίδιο προσανατολισμό με το καθολικό σύστημα και η αρχή του ορίζεται από τη θέση του διακριτού τμήματος στο καθολικό σύστημα. Το σύστημα αυτό διαφέρει από το τοπικό σύστημα που ορίζει πλήρως το διακριτό τμήμα, καθώς έχει διαφορετικό προσανατολισμό.

Αξίζει να σημειωθεί πως, επειδή τα δύο τμήματα της μεικτής κίνησης έχουν διαχωριστεί, υπάρχει η δυνατότητα εκμάθησης μόνο του ενός τμήματος από μια συγκεκριμένη επίδειξη, ενώ το άλλο μπορεί να διδαχθεί είτε από άλλη επίδειξη είτε ακόμα και να μοντελοποιηθεί μαθηματικά, εάν αυτό κρίνεται σκόπιμο ή ωφέλιμο. Σε κάθε περίπτωση ακολουθείται η ίδια μέθοδος διδασκαλίας, η οποία και αναλύεται ακολούθως.

3.3.1.2 Διδασκαλία διακριτού τμήματος (οδηγού)

Η διδασκαλία του διακριτού τμήματος της κίνησης γίνεται ακριβώς όπως η διδασκαλία των διακριτών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο και ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των βαρών $w_{i,d}$ της εξίσωσης (2.3) για τις έξι μεταβλητές της κίνησης, με βάση τις εξισώσεις (2.9) και (3.1)–(3.5).

3.3.1.3 Διδασκαλία περιοδικού τμήματος (ακόλουθου)

Η διδασκαλία του περιοδικού τμήματος της κίνησης γίνεται με τρόπο ανάλογο προς τη διδασκαλία των περιοδικών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο, με τη διαφορά ότι γίνεται χρήση των CCDMPs και των μεγεθών του διακριτού τμήματος για τον υπολογισμό των βαρών $w_{i,p}$ της εξίσωσης (2.27) και μόνο για τις τρεις χωρικές μεταβλητές της κίνησης.

Οι έξι μεταβλητές που περιγράφουν το διακριτό τμήμα της κίνησης χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των μητρών $R_{G,t}^L$ των εξισώσεων (2.22)–(2.27). Για κάθε χρονική στιγμή t χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα μεγέθη που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή για τη σύνθεση της μήτρας $R_{G,t}^L$.

Με βάση τις εξισώσεις (2.22)–(2.25) και τις υπολογισμένες μήτρες $R_{G,t}^L$ υπολογίζονται οι συναρτήσεις f_f^L , οι οποίες κωδικοποιούν τη χρονική εξέλιξη της μεταβλητής y_p στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται από τον οδηγό.

Στη συνέχεια, σε πλήρη αντιστοιχία με τη διδασκαλία των περιοδικών κινήσεων, υπολογίζονται οι ποσότητες $\phi_j (= \phi(t_j))$ και $\Gamma_i(\phi_j)$ για $i = 1, \dots, N$ και $j = 1, \dots, T$, με βάση τις εξισώσεις (2.15), (2.13) και (2.16) και δομούνται το διάνυσμα \mathbf{f}_f^L και ο πίνακας \mathbf{X}_f^L , με βάση

τις εξισώσεις (3.1) και (3.6) αντίστοιχα. Για τον πίνακα \mathbf{X}_f^L χρησιμοποιείται η τιμή r_f^L της εξίσωσης (2.27).

Αν κριθεί ωφέλιμο, διαγράφονται οι τιμές της συνάρτησης f_f^L στην αρχή και στο τέλος της κίνησης, οι οποίες αποκλίνουν από τις αναμενόμενες τιμές της, ώστε να μην επηρεαστεί η συνολική μορφή της, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο. Επιπλέον διαγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής ϕ και των συναρτήσεων Γ_i και υπολογίζονται εκ νέου ο πίνακας \mathbf{X}_f^L και το διάνυσμα \mathbf{f}_f^L .

Τέλος, υπολογίζεται το διάνυσμα \mathbf{w}_f^L σύμφωνα με την εξίσωση (3.5) και εξαγονται τα επιθυμητά βάρη $w_{i,p}$ ως τα στοιχεία του, με βάση την εξίσωση (3.3).

Οι τρεις μεταβλητές προσανατολισμού του περιοδικού τμήματος στο τοπικό σύστημα είναι σταθερές και οι τιμές τους εξαρτώνται από την επιθυμητή σχέση οδηγού-ακόλουθου. Κατά τη διδασκαλία επιλέγονται οι κατάλληλες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται αργότερα και κατά τη γενίκευση.

3.3.2 Γενίκευση

Κατά τη γενίκευση των μεικτών κινήσεων, ο στόχος είναι η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.20)–(2.21) προς εύρεση της τροχιάς $y_d^G(t_k)$ του διακριτού τμήματος της κίνησης, η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.24)–(2.25) προς εύρεση της τροχιάς $y_p^G(t_k)$ του περιοδικού τμήματος της κίνησης και ο συνδυασμός τους προς εύρεση της τελικής τροχιάς της μεικτής κίνησης $y_m^G(t_k)$. Η επίλυση πραγματοποιείται, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κινήσεις που έχουν διδαχθεί και τις επιθυμητές παραμέτρους της κίνησης, δηλαδή τη διάρκεια του διακριτού τμήματος της $\tau = \tau_l$, τη συχνότητα του περιοδικού τμήματός της $\Omega = \tau_f$, τα σημεία αρχής κάθε τμήματος της $y_{0,d}^G$ και $y_{0,p}^L$, το σημείο έλξης του διακριτού τμήματος της g_l^G , και το κέντρο g_f^G και πλάτος r_f^G της ταλάντωσης του περιοδικού τμήματος. Έτσι η γενίκευση μιας μεικτής κίνησης χωρίζεται σε τρία τμήματα.

3.3.2.1 Γενίκευση διακριτού τμήματος (οδηγού)

Η γενίκευση του διακριτού τμήματος της κίνησης γίνεται ακριβώς όπως η γενίκευση των διακριτών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο και ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της γενικευμένης τροχιάς $y_d^G(t_k)$ για τις έξι μεταβλητές της κίνησης, από την επίλυση του συστήματος μετασχηματισμού των εξισώσεων (2.20)–(2.21), χρησιμοποιώντας τα υπολογισμένα βάρη $w_{i,d}$ και τις επιθυμητές παραμέτρους γενίκευσης της κίνησης.

3.3.2.2 Γενίκευση περιοδικού τμήματος (ακόλουθου)

Η γενίκευση του περιοδικού τμήματος της κίνησης γίνεται με τρόπο ανάλογο προς τη γενίκευση των περιοδικών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο, με τη διαφορά ότι γίνεται χρήση των CCDMPs και των μεγεθών του διακριτού τμήματος για τον υπολογισμό της τροχιάς y_p^G των εξισώσεων (2.22)–(2.25) και μόνο για τις τρεις χωρικές μεταβλητές της κίνησης.

Η συνάρτηση f_f^L στο τοπικό σύστημα υπολογίζεται ακριβώς όπως και στην περίπτωση των απλών περιοδικών κινήσεων, κάνοντας χρήση και της εξίσωσης (2.27) και των υπολογισμένων βαρών $w_{i,p}$. Με βάση τη γενικευμένη τροχιά του διακριτού τμήματος της κίνησης δομούνται οι ομογενείς μήτρες μετασχηματισμού $R_{G,t}^L$ και χρησιμοποιώντας τις επιθυμητές παραμέτρους γενίκευσης της κίνησης επιλύεται το σύστημα διαφορικών εξισώσεων (2.24)–(2.25) προς εύρεση των τιμών $y_p^G(t_k)$

3.3.2.3 Συνδυασμός τμημάτων κίνησης

Τέλος οι γενικευμένες τροχιές των δύο τμημάτων της κίνησης $y_d^G(t_k)$ και $y_p^G(t_k)$ αθροίζονται για να δώσουν τη γενικευμένη τροχιά της μεικτής κίνησης $y_m^G(t_k)$, ενώ οι τρεις μεταβλητές προσανατολισμού της μεικτής κίνησης είναι κοινές με εκείνες του διακριτού τμήματος.

3.4 Κινήσεις εκτελούμενες από δύο χέρια

Εκτός από τις κινήσεις που πραγματοποιούνται από ένα χέρι, υπάρχουν και κινήσεις για τις οποίες είναι αναγκαία η χρήση δύο χεριών. Η κίνηση που εκτελεί κάθε χέρι μπορεί να είναι είτε διακριτή είτε περιοδική. Η κωδικοποίηση τέτοιων κινήσεων εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ των δύο χεριών, η οποία ποικίλει. Ως παραδείγματα αναφέρονται χειρονομίες στις οποίες η κίνηση μόνο του ενός χεριού εξαρτάται από την κίνηση του άλλου, χειρονομίες στις οποίες τα δύο χέρια εκτελούν μια κίνηση σε σχηματισμό, όπως κατά το χειρισμό κάποιου αντικειμένου και χειρονομίες στις οποίες κανένα από τα δύο χέρια δεν έχει κυρίαρχο ρόλο. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το τελευταίο είδος χειρονομιών και λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η περίπτωση που κάθε χέρι εκτελεί μια διακριτή κίνηση.

Κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων διερευνήθηκε μια μέθοδος για την κωδικοποίηση των κινήσεων δύο χεριών, η οποία έκανε χρήση των CCDMPs, είχε όμως περιορισμένο εύρος χρήσης, καθώς ήταν σε θέση να αντιμετωπίσει μόνο συγκεκριμένους περιορισμούς μεταξύ των δύο χεριών και χρειαζόταν ανθρώπινη εποπτεία. Για να βρίσκει εφαρμογή σε πολλαπλές διαφορετικές περιστάσεις μια τέτοια μέθοδος είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας νέας μεθόδου που θα εξάγει πρώτα τους διάφορους περιορισμούς που υπάρχουν μεταξύ των δύο χεριών, σε κάθε περίπτωση, και αυστηρώς με βάση τα δεδομένα της επίδειξης και όχι με κάποια ανθρώπινη εποπτεία. Απουσία της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται η ακόλουθη απλοποιημένη μέθοδος κωδικοποίησης.

Λόγω του αναγκαίου συγχρονισμού μεταξύ των κινήσεων χρησιμοποιείται ένα κοινό κανονικό σύστημα και για τα δύο χέρια, ενώ η κίνηση του κάθε χεριού θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητη από το άλλο, δηλαδή δε λαμβάνονται υπ' όψιν οι περιορισμοί που ενδέχεται να διέπουν τη συντονισμένη κίνηση των δύο χεριών.

3.4.1 Διδασκαλία

Η διδασκαλία της κίνησης κάθε χεριού γίνεται ακριβώς όπως η διδασκαλία των διακριτών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο και ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των βαρών $w_{i,R}$ και $w_{i,L}$ της εξίσωσης (2.3) για το δεξί και για το αριστερό χέρι αντίστοιχα και για τις έξι μεταβλητές της κίνησης, με βάση τις εξισώσεις (2.9) και (3.1)–(3.5).

3.4.2 Γενίκευση

Η γενίκευση της κίνησης κάθε χεριού γίνεται ακριβώς όπως η γενίκευση των διακριτών κινήσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο και ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των γενικευμένων τροχιών $y_R(t_k)$ και $y_L(t_k)$ για το δεξί και για το αριστερό χέρι αντίστοιχα και για τις έξι μεταβλητές της κίνησης, από την επίλυση του συστήματος μετασχηματισμού των εξισώσεων (2.7)–(2.8), χρησιμοποιώντας τα υπολογισμένα βάρη $w_{i,R}$ και $w_{i,L}$ και τις επιθυμητές παραμέτρους γενίκευσης της κίνησης.

Η επιλογή των παραμέτρων της γενίκευσης που αφορούν τη χωρική κλιμάκωση κάθε κίνησης, δηλαδή την ποσότητα $(g - y_0)$, θα πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να διατηρείται η συμμετρία μεταξύ των δύο χεριών.

3.5 Παραμετροποιημένες κινήσεις ενός χεριού

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, υπάρχουν διάφορες τεχνικές παραμετροποίησης κινήσεων που κάνουν χρήση CTs. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μέθοδος μεταβολής της τροχιάς μιας διακριτής κίνησης με τη χρήση μιας παραμέτρου λ και καταγεγραμμένων επιδείξεων της κίνησης. Η παράμετρος λ λαμβάνει τιμές στο συνεχές διάστημα $[0, 1]$ ανάλογα με το κατά πόσο εκφράζεται η επιθυμητή συμπεριφορά. Συγκεκριμένα για $\lambda = 0$ η επιθυμητή συμπεριφορά δεν εκφράζεται καθόλου, ενώ για $\lambda = 1$ η επιθυμητή συμπεριφορά εκφράζεται στο μέγιστο βαθμό. Οι επιδείξεις της κίνησης που καταγράφονται αντιστοιχούν στις τιμές 0 και 1 της παραμέτρου λ .

Με βάση τα ανωτέρω και την εξίσωση (2.30), η μορφή του CT που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση των παραμετροποιημένων κινήσεων είναι

$$C_t = \lambda (h(x) - f(x)) = \lambda e(x) \quad , \quad (3.9)$$

όπου $h(x)$ και $f(x)$ είναι οι μη γραμμικές συναρτήσεις που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.7)–(2.8) και αντιστοιχούν στη μέγιστη έκφραση της επιθυμητής συμπεριφοράς και στη μη έκφραση αυτής αντίστοιχα.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για την κωδικοποίηση των διακριτών κινήσεων, οι δύο καταγεγραμμένες κινήσεις παραμένουν συγχρονισμένες στο πεδίο της μεταβλητής x , ακόμα κι αν έχουν διαφορετικές διάρκειες, εφόσον η παράμετρος α_x παραμένει σταθερή για όλους τους υπολογισμούς. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη λήψη της διαφοράς των συναρτήσεων $h(x)$ και $f(x)$ χωρίς κάποια χρονική κλιμάκωση.

Η υλοποίηση αυτή παράγει μια ικανοποιητικά ακριβή κίνηση η οποία ακολουθεί τη μορφή της βασικής κίνησης και ταυτόχρονα εκφράζει στον επιλεγμένο βαθμό την επιθυμητή συμπεριφορά παραμένοντας απλή και εύχρηστη, λόγω της μοναδικής ρυθμιζόμενης παραμέτρου ελέγχου και του μικρού αριθμού απαραίτητων επιδείξεων.

3.5.1 Διδασκαλία

Κατά τη διδασκαλία των παραμετροποιημένων διακριτών κινήσεων, στόχος είναι ο προσδιορισμός των βαρών u_i της μη γραμμικής συνάρτησης $e(x)$ της εξίσωσης (3.9), σε αντιστοιχία με τα βάρη w_i της συνάρτησης $f(x)$, σύμφωνα με την εξίσωση (2.3).

Αρχικά καταγράφονται δύο επιδείξεις μιας κίνησης. Σε μια από αυτές, η επιθυμητή συμπεριφορά εκφράζεται στο μέγιστο βαθμό ($\lambda = 1$), ενώ στην άλλη η επιθυμητή συμπεριφορά δεν εκφράζεται καθόλου ($\lambda = 0$). Για τις δύο αυτές επιδείξεις ακολουθείται η ίδια μέθοδος διδασκαλίας με την περίπτωση των διακριτών κινήσεων ενός χεριού που αναλύθηκε προηγουμένως και υπολογίζονται οι μη γραμμικές συναρτήσεις $h(x)$ και $f(x)$ αντίστοιχα, καθώς και τα βάρη v_i και w_i αντίστοιχα. Τέλος υπολογίζονται τα βάρη u_i ως $u_i = v_i - w_i$.

3.5.2 Γενίκευση

Κατά τη γενίκευση των παραμετροποιημένων διακριτών κινήσεων, ο στόχος είναι η επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.30)–(2.31), δεδομένης και της εξίσωσης (3.9) προς εύρεση της τροχιάς $y(t_k)$, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κινήσεις που έχουν διδαχθεί και τις επιθυμητές παραμέτρους της κίνησης, δηλαδή τη διάρκεια της $\tau = t_T$, το σημείο αρχής της y_0 , το σημείο έλξης g και την τιμή της παραμέτρου λ .

Αρχικά δομείται το σύνολο των χρονικών στιγμών t_k , το οποίο ξεκινά από $t_1 = 0$ και καταλήγει σε $t_T = \tau$ που ισούται με την επιθυμητή διάρκεια της κίνησης. Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις εξισώσεις (2.5), (2.3) και (2.6) δομείται το σύνολο $x_k (= x(t_k))$ και οι συναρτήσεις $\Psi_i(x_k)$ για $i = 1, \dots, N$ και $k = 1, \dots, T$.

Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα βάρη w_i και u_i που έχουν διδαχθεί για τη συγκεκριμένη κίνηση, μαζί με τα υπολογισμένα x_k , $\Psi_i(x_k)$ και τα δοσμένα g και y_0 και υπολογίζονται οι τιμές $f(t_k)$ και $e(t_k)$, σύμφωνα με την εξίσωση (2.3). Οι τιμές αυτές σε συνδυασμό με την τιμή της παραμέτρου λ χρησιμοποιούνται με τη σειρά τους στην επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.30)–(2.31) προς εύρεση των τιμών $y(t_k)$.

3.6 Μέθοδος γενίκευσης βάσει πολλαπλών δεδομένων επίδειξης

Η προηγούμενη μεθοδολογία γενίκευσης είναι αρκετά χρήσιμη και αποτελεσματική, καθώς επιτρέπει τη γρήγορη και εκμάθηση και την απλή γενίκευση κινήσεων από μια μοναδική επίδειξη, αλλά αυξάνει το σφάλμα μεταξύ της γενικευμένης και της αναμενόμενης κίνησης, όσο η γενίκευση απομακρύνεται χωρικά από τη διαθέσιμη επίδειξη. Μια προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος αυτού γίνεται στο [23]. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται βασίζεται σε διαφορετική μέθοδο υπολογισμού των βαρών w_i που χρησιμοποιούνται κατά τη γενίκευση από τη μέθοδο που περιγράφηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπό όψιν της πολλαπλές επιδείξεις μιας κίνησης, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία της γενίκευσης.

Στη μέθοδο αυτή, κατά τη διδασκαλία υπολογίζονται για πολλαπλές επιδείξεις της κίνησης, οι αντίστοιχες συναρτήσεις f και οι τιμές μιας παραμέτρου q που σχετίζεται με την εκάστοτε κίνηση (π.χ. το τελικό σημείο στον καρτεσιανό χώρο για μια διακριτή χειρονομία). Οι τιμές της παραμέτρου q χρησιμοποιούνται, ανάλογα και με το συνολικό αριθμό των επιδείξεων, για τον υπολογισμό ενός μέτρου απόστασης d (π.χ. Ευκλείδεια) μεταξύ των επιδείξεων, στο χώρο της μεταβλητής q . Κατά τη γενίκευση επιλέγεται για τη γενικευμένη κίνηση μια τιμή της παραμέτρου q η οποία υπολογίζεται με βάση τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κίνησης και υπολογίζεται η απόσταση της d από τις διαθέσιμες επιδείξεις. Τέλος υπολογίζονται τα βάρη w , τα οποία ελαχιστοποιούν τη διαφορά της συνάρτησης f που παράγουν με τις σταθμισμένες συναρτήσεις f των διαθέσιμων επιδείξεων. Οι συναρτήσεις f σταθμίζονται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση d που υπολογίστηκε προηγουμένως. Με τον τρόπο αυτό η γενίκευση επηρεάζεται περισσότερο από τις πλησιέστερες επιδείξεις, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια της.

Η μέθοδος αυτή δοκιμάστηκε πειραματικά αλλά τελικώς δεν ακολουθήθηκε, καθώς για να αυξηθεί σημαντικά η ακρίβεια της γενίκευσης που παράγει σε σχέση με την προτεινόμενη μέθοδο χρειαζόταν μεγάλο αριθμό επιδείξεων για μια συγκεκριμένη κίνηση (εκθετική αύξηση αναγκαίων επιδείξεων για κάθε βαθμό ελευθερίας που προστίθεται), γεγονός που καθυστερεί και περιπλέκει τη διδασκαλία κάποιας νέας κίνησης, ενώ αυξάνονται τα δεδομένα που πρέπει να αποθηκευτούν. Επιπλέον, στην περίπτωση που η διδασκαλία πραγματοποιείται παρουσία περιορισμένων επιδείξεων, η μέθοδος αυτή έχει συγκρίσιμη, αν όχι χαμηλότερη, ακρίβεια με την προτεινόμενη.

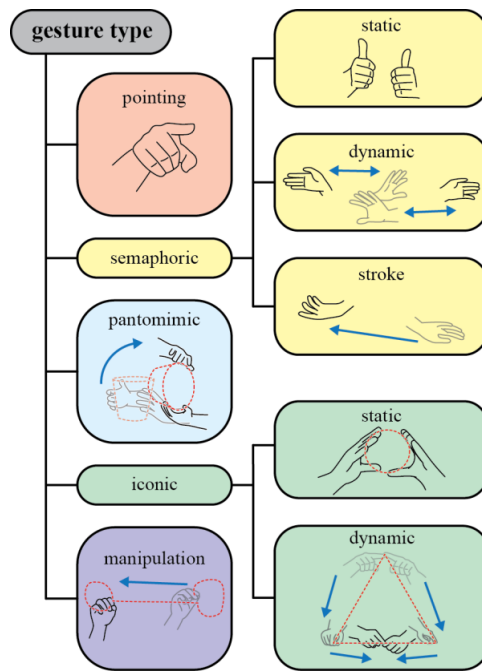
Κεφάλαιο 4

Πρακτική Υλοποίηση Συστήματος Εκπαίδευσης Χειρονομιών στο Ρομπότ ΝΑΟ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου μάθησης από επίδειξη που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά περιγράφεται η επιλογή και η καταγραφή κινήσεων, το σύστημα αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε και η επεξεργασία των μετρήσεων. Έπτερα γίνεται μια προσπάθεια μετατροπής των δεδομένων κίνησης από το ανθρώπινο μοντέλο κίνησης στο μοντέλο της ρομποτικής πλατφόρμας ΝΑΟ.

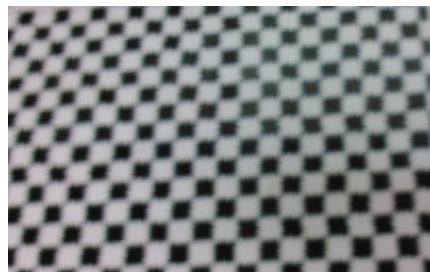
4.1 Επιλογή και καταγραφή κινήσεων

Οι χειρονομίες που χρησιμοποιεί ένας άνθρωπος χωρίζονται σε πέντε κύριες κατηγορίες σύμφωνα με το [1]. Περιληπτικά οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4.1. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν δεικτικές χειρονομίες (pointing), δυναμικές σηματοφορικές (dynamic semaphoric), χειρονομίες παντομίμας (pantomimic), δυναμικές χειρονομίες απεικόνισης (dynamic iconic) και χειρονομίες εικονικού χειρισμού αντικειμένων (manipulation). Οι χειρονομίες επιλέχθηκαν ώστε τα δάκτυλα των χεριών να παραμένουν στάσιμα και έτσι να μειωθεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου και να είναι δυνατή η αναπαραγωγή των χειρονομιών από ρομπότ στα οποία είναι περιορισμένος ή αδύνατος ο έλεγχος των επιμέρους δακτύλων. Επίσης επιλέχθηκαν χειρονομίες που πραγματοποιούνται τόσο με ένα χέρι (unimanual) όσο και με δύο χέρια (bimanual).



Σχήμα 4.1: Ταξινόμηση χειρονομιών (από το [1])

Για να διευκολυνθεί η διαδικασία καταγραφής χειρονομιών κατασκευάστηκε ένα χάρτινο πλέγμα διαστάσεων 58 cm επί 58 cm, το οποίο αποτελείται από τετράγωνα διάστασης 1 cm λευκού και μαύρου χρώματος εναλλάξ σε μορφή σκακιέρας. Το πλέγμα αυτό αποτελεί μια δισδιάστατη προβολή του τρισδιάστατου χώρου εργασίας και φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Πλέγμα καταγραφής μετρήσεων

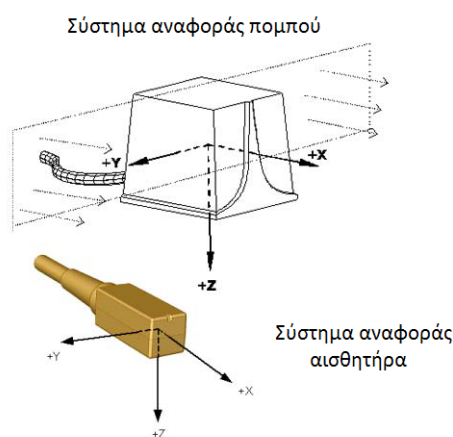
Επίσης χρησιμοποιήθηκαν αντικείμενα διαφορετικών μεγεθών, τα οποία τοποθετήθηκαν στο πλέγμα ώστε να βοηθήσουν στην οπτικοποίηση της τρίτης διάστασης του χώρου εργασίας κατά την καταγραφή των κινήσεων. Κάποια από αυτά τα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν ως βοηθήματα στην επίδειξη των κινήσεων, όπως στην περίπτωση των δεικτικών χειρονομιών όπου χρησιμοποιήθηκαν ως στόχοι επίδειξης.

Για την καταγραφή των κινήσεων έγινε χρήση του συστήματος μαγνητικών αισθητήρων 3D Guidance trakSTAR της εταιρίας Ascension (<https://www.ascension-tech.com>), το οποίο εικονίζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Το σύστημα μαγνητικών αισθητήρων 3D Guidance trakSTAR της εταιρίας Ascension (μονάδα ελέγχου, μαγνητικοί αισθητήρες, μαγνητικός πομπός)

Το σύστημα των αισθητήρων λειτουργεί από προεπιλογή με τα συστήματα αναφοράς, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση προεπιλεγμένων συστημάτων αναφοράς πομπού και αισθητήρων

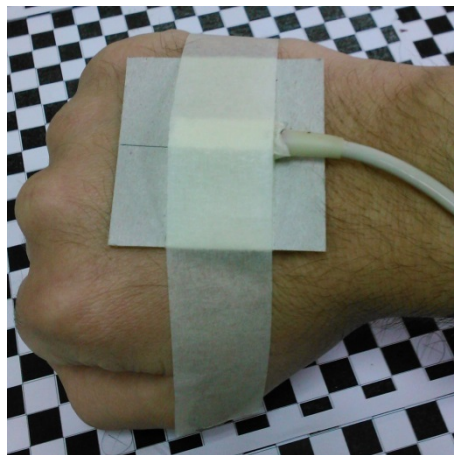
Το συγκεκριμένο σύστημα αισθητήρων έχει τη δυνατότητα να καταγράφει δεδομένα με συχνότητα έως και 240 Hz, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του συστήματος των αισθητήρων ([4]). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ως συχνότητα δειγματοληψίας η προεπιλεγμένη τιμή $F_s = 205$ Hz. Επίσης, το σύστημα αυτό παρέχει μεγάλη ακρίβεια καταγραφής, τόσο της θέσης κάθε αισθητήρα, όπου το RMSE (Root Mean Square Error), δηλαδή η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, είναι 1,4 mm, όσο και του προσανατολισμού του, όπου το RMSE είναι $0,5^\circ$ ([4]).

Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος αισθητήρων είναι η επίδραση που έχει η εγγύτητα των αισθητήρων σε μεταλλικές επιφάνειες ή σε ηλεκτρικές συσκευές. Στην περίπτωση των μεταλλικών επιφανειών υπάρχει σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου μεγέθους και της πραγματικής τιμής του, το οποίο εξαρτάται από τη θέση του αισθητήρα και είναι τέτοιας μορφής ώστε να παρουσιάζεται σαν μια φυσιολογική κίνηση του αισθητήρα καθιστώντας αδύνατη την διόρθωσή του. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών συσκευών παρατηρούνται τυχαία άλματα στις τιμές των μετρήσεων, λόγω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή

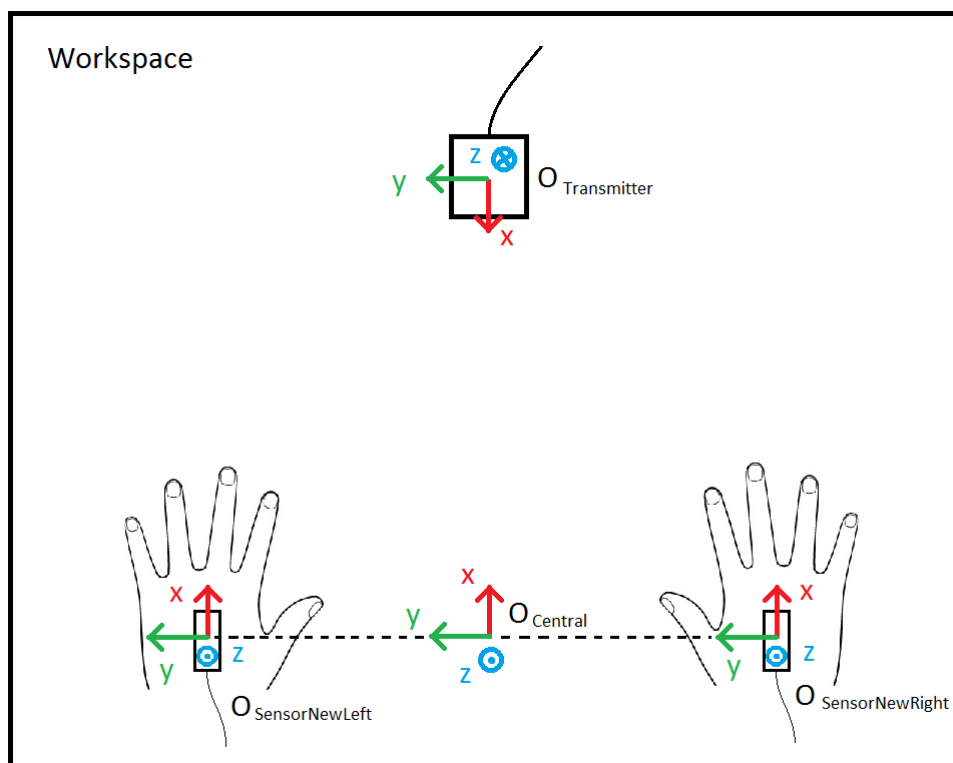
του αισθητήρα από τη λειτουργία τους. Το σφάλμα που εισάγεται με αυτό τον τρόπο είναι δύσκολο να διορθωθεί πλήρως και υπάρχει η πιθανότητα να υπάρχει ανακρίβεια στις μετρήσεις. Για το λόγο αυτό η διενέργεια των μετρήσεων έγινε σε περιβάλλον το οποίο περιείχε όσο το δυνατόν λιγότερες μεταλλικές επιφάνειες και ηλεκτρικές συσκευές.

Οι αισθητήρες αυτοί κατέστησαν δυνατή την καταγραφή έξι μεταβλητών στο χρόνο και συγκεκριμένα τριών μεταβλητών θέσης x , y , z και τριών μεταβλητών προσανατολισμού θ_z , θ_y , θ_x . Κατεγράφησαν επίσης οι χρονικές στιγμές στις οποίες αντιστοιχούν οι τιμές των έξι αυτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές θέσης είναι οι αποστάσεις του κέντρου του συστήματος αναφοράς κάθε αισθητήρα από το κέντρο του συστήματος αναφοράς του πομπού για τους τρεις άξονες x , y , z στο σύστημα αναφοράς του πομπού, εκφρασμένες σε ίντσες. Οι μεταβλητές προσανατολισμού είναι οι γωνίες Euler που προσδιορίζουν το σχετικό προσανατολισμό του συστήματος αναφοράς κάθε αισθητήρα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του πομπού, εκφρασμένες σε μοίρες. Ως γωνίες Euler χρησιμοποιούνται οι γωνίες της τριάδας ZYX , όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι οποίες αναφέρονται στο εγχειρίδιο του συστήματος των αισθητήρων ως γωνίες αζιμούθιου (*azimuth*), ανύψωσης (*elevation*) και κύλισης (*roll*) αντίστοιχα, σε αντίθεση με τις ονομασίες που δόθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (γωνίες στροφής (*yaw*), ανύψωσης (*pitch*) και κύλισης (*roll*) αντίστοιχα).

Οι μαγνητικοί αισθητήρες προσαρμόστηκαν στην εξωτερική πλευρά της παλάμης κάθε χεριού του εργαστηριακού μελετητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η διάταξη καταγραφής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση της θέσης των αισθητήρων στο ανθρώπινο χέρι



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση διάταξης καταγραφής και τελικών συστημάτων αναφοράς χώρου, αισθητήρων και πομπού στο χώρο διενέργειας μετρήσεων

Επειδή η θέση του εργαστηριακού μελετητή ενδέχεται να αλλάζει από τη μια κίνηση στην άλλη, καθώς οι μετρήσεις γίνονται στο σύστημα αναφοράς του πομπού, το οποίο δεν μετακινείται καθ' όλη τη διάρκεια των καταγραφών, αλλά και επειδή το σύστημα δεν διέθετε τρίτο αισθητήρα, ο οποίος θα τοποθετούταν σε προκαθορισμένο σημείο στον κορμό του μελετητή, κρίθηκε ωφέλιμο να υπάρχει μια στάση αρχικοποίησης για τα χέρια του μελετητή. Στη στάση αυτή, ο μελετητής έχει τα χέρια του επάνω στην επιφάνεια εργασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.

Οι χειρονομίες που καταγράφηκαν είναι οι ακόλουθες :

- Δεικτικές χειρονομίες προς κάποιο πραγματικό ή εικονικό αντικείμενο με διαφοροποίηση στη θέση του αντικειμένου και στο μέγεθός του αλλά και χρησιμοποιώντας διαφορετικούς προσανατολισμούς παλάμης.
- Δυναμικές σηματοφορικές χειρονομίες, οι οποίες μετέφεραν τα ακόλουθα μηνύματα : «Γεια σου», «Σήκω επάνω», «Κάτσε κάτω», «Έλα κοντά».
- Χειρονομίες παντομίμας (ή εικονικού χειρισμού αντικειμένων), οι οποίες αναπαριστούσαν τις ακόλουθες λειτουργίες : βάψιμο τοίχου, οδήγηση αυτοκινήτου, οδήγηση ποδηλάτου, καθαρισμός παραθύρου, σκάψιμο με φτυάρι.

- Δυναμικές χειρονομίες απεικόνισης, οι οποίες αναπαριστούσαν τα ακόλουθα σχήματα : κύκλος, τετράγωνο, ορθογώνιο, τρίγωνο, ρόμβος.

Για κάθε είδος κίνησης που καταγράφηκε έγιναν πολλαπλές καταγραφές ώστε να υπάρχει πλεονασμός δεδομένων. Μεταξύ των καταγραφών υπήρχε διαφοροποίηση σε κάποια χαρακτηριστικά της κίνησης, όπως τα σημεία αρχής και πέρατος της, η διάρκεια της, η συχνότητά και ο αριθμός επαναλήψεων της και η μορφή της (διακύμανση στην ένταση της κίνησης για δεικτικές χειρονομίες).

Για κάθε χειρονομία που καταγράφηκε εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες ενέργειες:

1. Επιλογή είδους χειρονομίας που θα πραγματοποιηθεί
2. Κατά προσέγγιση επιλογή χαρακτηριστικών κίνησης (διάρκεια, συχνότητα, αρχικό σημείο, τελικό σημείο, αριθμός επαναλήψεων, μορφή κίνησης (π.χ. επιθετικότητα)
3. Έναρξη καταγραφής θέσεων και προσανατολισμού των αισθητήρων
4. Αρχικοποίηση των θέσεων των αισθητήρων στις προεπιλεγμένες θέσεις
5. Επίδειξη χειρονομίας
6. Τερματισμός καταγραφής θέσεων και προσανατολισμού των αισθητήρων

Για κάθε χειρονομία καταγράφηκαν έξι χρονοσειρές (μία για κάθε μεταβλητή) καθώς και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες έγιναν οι καταγραφές.

4.2 Επεξεργασία μετρήσεων

4.2.1 Προεπεξεργασία μετρήσεων

Για να ληφθούν οι ποσότητες, τις οποίες χρειάζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρειάστηκε πρώτα η επεξεργασία των μετρήσεων.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί μέτρα ως μονάδα μέτρησης για τις αποστάσεις και μοίρες ως μονάδα μέτρησης για τις γωνίες Euler, οπότε χρειάστηκε να μετατραπούν οι καταγεγραμμένες αποστάσεις από ίντσες σε μέτρα.

Ύστερα επιλέχθηκε ένα σύστημα αναφοράς για το χώρο στον οποίο διενεργήθηκαν οι μετρήσεις. Το κέντρο του συστήματος επιλέχθηκε ως το κέντρο μεταξύ των δύο χεριών στη θέση αρχικοποίησης, ενώ οι τρεις άξονες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον προσανατολισμό του εργαστηριακού μελετητή ως εξής :

- ο άξονας x στην κατεύθυνση από πίσω προς μπροστά
- ο άξονας y στην κατεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά
- ο άξονας z στην κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω

Επίσης έγινε επιλογή των συστημάτων αναφοράς για τις παλάμες των χεριών του εργαστηριακού μελετητή. Ως κέντρα των συστημάτων αναφοράς επιλέχθηκαν τα κέντρα των αισθητήρων, τα οποία κατά προσέγγιση συμπίπτουν με το κέντρο κάθε παλάμης, ενώ οι τρεις άξονες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον προσανατολισμό της παλάμης του εργαστηριακού μελετητή ως εξής:

- ο άξονας x πάνω στο επίπεδο της παλάμης και στην κατεύθυνση που δείχνουν τα δάκτυλα τεντωμένα
- ο άξονας y πάνω στο επίπεδο της παλάμης, κάθετα στη διεύθυνση των δακτύλων και από το δείκτη προς τον αντίχειρα για το δεξί χέρι και από τον αντίχειρα προς το δείκτη για το αριστερό χέρι
- ο άξονας z κάθετος στο επίπεδο της παλάμης στην κατεύθυνση από το εσωτερικό προς το εξωτερικό της παλάμης

Το σύστημα αναφοράς του χώρου και το νέο σύστημα αναφοράς των αισθητήρων φαίνονται στο Σχήμα 4.6.

Ακολούθησε μετασχηματισμός των μεταβλητών θέσης και προσανατολισμού από τα προεπιλεγμένα συστήματα αναφοράς του πομπού και των αισθητήρων (Σχήμα 4.4), στα νέα συστήματα αναφοράς (Σχήμα 4.6) σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως.

Για κάθε καταγεγραμμένη χρονική στιγμή t_j με $j \in (1, \dots, T)$, όπου T το τελευταίο καταγεγραμμένο δείγμα μιας κίνησης, η ομογενής μήτρα μετασχηματισμού που περιγράφει τα νέα συστήματα αναφοράς των αισθητήρων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του χώρου διενέργειας των μετρήσεων δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{A}_{SensorNew,j}^{Central} = \mathbf{A}_{Transmitter,j}^{Central} \mathbf{A}_{SensorOld,j}^{Transmitter} \mathbf{A}_{SensorNew,j}^{SensorOld}, \quad (4.1)$$

όπου χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί

- *Central* για το σύστημα του χώρου διενέργειας των μετρήσεων
- *Transmitter* για το προεπιλεγμένο σύστημα του πομπού
- *SensorOld* για το προεπιλεγμένο σύστημα των αισθητήρων
- *SensorNew* για το νέο σύστημα των αισθητήρων

Από τα Σχήματα 4.4 και 4.6 και από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους αισθητήρες για τη θέση αρχικοποίησης, προκύπτουν οι σχέσεις

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{Transmitter,j}^{Central} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Transmitter,j}^{Central} & \mathbf{o}_{Transmitter,j}^{Central} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_y(180^\circ) & \mathbf{d} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & -1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

όπου \mathbf{d} το διάνυσμα θέσης του συστήματος αναφοράς του πομπού ως προς το σύστημα αναφοράς του χώρου διενέργειας μετρήσεων, το οποίο ενδέχεται να διαφέρει από καταγραφή σε καταγραφή,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{SensorNew,j}^{SensorOld} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{SensorNew,j}^{SensorOld} & \mathbf{o}_{SensorNew,j}^{SensorOld} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_x(180^\circ) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.3)$$

και

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{SensorOld,j}^{Transmitter} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{SensorOld,j}^{Transmitter} & \mathbf{o}_{SensorOld,j}^{Transmitter} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_z(\theta_{z,j}) \mathbf{R}_y(\theta_{y,j}) \mathbf{R}_x(\theta_{x,j}) & \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_{\theta_{z,j}} c_{\theta_{y,j}} & c_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{y,j}} s_{\theta_{x,j}} - s_{\theta_{z,j}} c_{\theta_{x,j}} & c_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{y,j}} c_{\theta_{x,j}} + s_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{x,j}} & x_j \\ s_{\theta_{z,j}} c_{\theta_{y,j}} & s_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{y,j}} s_{\theta_{x,j}} + c_{\theta_{z,j}} c_{\theta_{x,j}} & s_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{y,j}} c_{\theta_{x,j}} - c_{\theta_{z,j}} s_{\theta_{x,j}} & y_j \\ -s_{\theta_{y,j}} & c_{\theta_{y,j}} s_{\theta_{x,j}} & c_{\theta_{y,j}} c_{\theta_{x,j}} & z_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου τα s_i και c_i αποτελούν συντομογραφίες των $\sin(i)$ και $\cos(i)$ αντίστοιχα.

Η μήτρα $\mathbf{A}_{SensorOld,j}^{Transmitter}$ διαμορφώνεται σύμφωνα με τις καταγραφόμενες ποσότητες x_j , y_j , z_j , $\theta_{z,j}$, $\theta_{y,j}$ και $\theta_{x,j}$.

Από την ομογενή μήτρα μετασχηματισμού

$$\mathbf{A}_{SensorNew,j}^{Central} = \begin{bmatrix} & & & x'_j \\ & \mathbf{R}(\theta'_{z,j}, \theta'_{y,j}, \theta'_{x,j}) & & y'_j \\ & & & z'_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

εξάγονται οι νέες μεταβλητές θέσης x'_j, y'_j, z'_j για τα επιθυμητά συστήματα αναφοράς.

Από τις (4.1)–(4.5) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η αρχή του συστήματος αναφοράς του χώρου διενέργειας μετρήσεων λαμβάνεται ως το κεντρικό σημείο μεταξύ των δύο αισθητήρων, όταν εκείνοι βρίσκονται στη θέση αρχικοποίησης. Ισχύει δηλαδή

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{όταν} \quad \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{R,init} + x_{L,init}}{2} \\ \frac{y_{R,init} + y_{L,init}}{2} \\ \frac{z_{R,init} + z_{L,init}}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

όπου οι δείκτες R και L υποδηλώνουν τους αισθητήρες στο δεξί και στο αριστερό χέρι αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης $init$ υποδηλώνει τη θέση αρχικοποίησης.

Αντικαθιστώντας τη (4.7) στην (4.6) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{R,init} + x_{L,init}}{2} \\ -\frac{y_{R,init} + y_{L,init}}{2} \\ \frac{z_{R,init} + z_{L,init}}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Οι νέες γωνίες Euler $\theta'_{z,j}, \theta'_{y,j}, \theta'_{x,j}$ για τα επιθυμητά συστήματα αναφοράς υπολογίζονται από τις σχέσεις

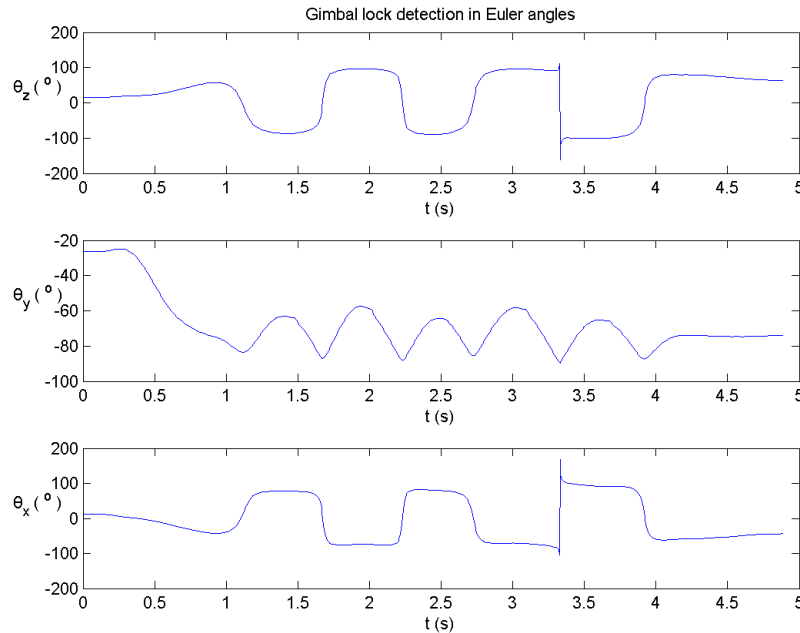
$$\begin{aligned} \theta'_{z,j} &= \text{Atan2}(r_{21}, r_{11}) \\ \theta'_{y,j} &= \text{Atan2}\left(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}\right) \\ \theta'_{x,j} &= \text{Atan2}(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

όπου ως r_{nm} συμβολίζεται το στοιχείο της γραμμής n και της στήλης m του πίνακα $\mathbf{R}(\theta'_{z,j}, \theta'_{y,j}, \theta'_{x,j})$ της σχέσης (4.5).

Στην περίπτωση που η γωνία θ'_y λάβει την τιμή $\pi/2$ ή την τιμή $-\pi/2$, τότε οι εξισώσεις (4.9) εκφυλίζονται και είναι δυνατός ο προσδιορισμός μόνο του αθροίσματος ($\theta'_y = -\pi/2$) ή

της διαφοράς ($\theta'_y = \pi/2$) των γωνιών θ'_z και θ'_x . Η κατάσταση αυτή καλείται gimbal lock και αποτελεί ένα βασικό μειονέκτημα της χρήσης γωνιών Euler για την περιγραφή του προσανατολισμού ενός στερεού σώματος. Στις περιπτώσεις αυτές ενδέχεται να υπάρχουν σημαντικά σφάλματα ή ακόμη και άλματα στις καταγραφόμενες τιμές των άλλων δύο γωνιών.

Ένα παράδειγμα gimbal lock εμφανίζεται σε μια καταγραφή της χειρονομίας χαιρετισμού, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι τιμές των γωνιών θ_z , θ_y και θ_x , οι οποίες παριστάνουν τις περιστροφές γύρω από τους άξονες z , y και x αντίστοιχα. Τη χρονική στιγμή $t = 3,35\text{ s}$, η τιμή της γωνίας θ_y αγγίζει την τιμή -90° και παρατηρείται άλμα στις τιμές των γωνιών θ_z και θ_x .



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση τιμών γωνιών Euler στην κατάσταση gimbal lock ($t = 3,35\text{ s}$)

Στις καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας παρατηρήθηκαν περιπτώσεις τέτοιων αλμάτων στις τιμές των γωνιών. Εν τέλει, οι καταγραφές αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μην επηρεαστεί η διαδικασία διδασκαλίας. Η παράβλεψη αυτών των καταγραφών δεν επηρέασε τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, καθώς για κάθε κίνηση υπήρχε πλεονασμός καταγεγραμμένων επιδείξεων.

Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί με τη χρήση ενός καταγραφικού συστήματος που θα ήταν σε θέση να υπολογίσει τον προσανατολισμό σε quaternions αντί για γωνίες Euler.

4.2.2 Φιλτράρισμα με χρήση φίλτρου Savitzky-Golay

Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τους αισθητήρες, είναι πιθανό να περιέχουν κάποιο θόρυβο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην περιγραφή του συστήματος των αισθητήρων. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαίο το φιλτράρισμα τους και επιλέχθηκε το φίλτρο Savitzky-Golay.

Το φίλτρο Savitzky-Golay είναι ένα ψηφιακό φίλτρο το οποίο προσαρμόζει ένα πολυώνυμο σε διαδοχικά παράθυρα του σήματος εισόδου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η έξοδος του φίλτρου για τη θέση που αντιστοιχεί στο μέσο του παραθύρου είναι η τιμή του πολυωνύμου που προσαρμόστηκε στο παράθυρο αυτό.

Στην αρχική δημοσίευση των Savitzky και Golay ([17]), αποδεικνύεται ότι η έξοδος του φίλτρου σε ένα σημείο n προκύπτει από γραμμικό συνδυασμό του παραθύρου το οποίο επικεντρώνεται γύρω από το σημείο n . Επιπλέον, οι συντελεστές του γραμμικού αυτού συνδυασμού εξαρτώνται μόνο από το βαθμό του πολυωνύμου και το μέγεθος του παραθύρου και όχι από το σήμα στην είσοδο του φίλτρου ή από τη θέση του εκάστοτε παραθύρου στο σήμα αυτό.

Η διαδικασία εξαγωγής των συντελεστών είναι η ακόλουθη :

Έστω το σήμα $x[n]$. Για την προσέγγισή του από το πολυώνυμο $p(n) = \sum_{k=0}^N \alpha_k n^k$ πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα

$$\mathcal{E}_N = \sum_{n=-M}^M (p(n) - x[n])^2 = \sum_{n=-M}^M \left(\sum_{k=0}^N \alpha_k n^k - x[n] \right)^2 \quad (4.10)$$

Αυτό επιτυγχάνεται παραγωγίζοντας την ποσότητα \mathcal{E}_N ως προς κάθε άγνωστο α_k και εξισώνοντας με το 0. Έτσι προκύπτουν οι $N + 1$ κανονικές εξισώσεις του προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων:

$$\sum_{k=0}^N \left(\sum_{n=-M}^M n^{i+k} \right) \alpha_k = \sum_{n=-M}^M n^i x[n] \quad , i = 0, 1, \dots, N \quad (4.11)$$

Αν οριστεί ως $\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N]^T$ το διάνυσμα πολυωνυμικών συντελεστών και ως $A = \{\alpha_{n,i}\}$ η μήτρα με στοιχεία

$$\alpha_{n,i} = n^i \quad , -M \leq n \leq M \quad , i = 0, 1, \dots, N$$

τότε το σύστημα εξισώσεων (4.11) μπορεί να γραφεί σε μορφή μητρών ως

$$A^T A \alpha = A^T x$$

η λύση του οποίου είναι

$$\alpha = (A^T A)^{-1} A^T x = Hx$$

Η έξοδος y ενός ψηφιακού φίλτρου h δίνεται από την εξίσωση

$$y[n] = \sum_{m=-M}^M h[m]x[n-m] = \sum_{m=n-M}^{n+M} h[n-m]x[m] \quad (4.12)$$

Η έξοδος y για την κεντρική τιμή του n , δηλαδή για $n = 0$, είναι η τιμή που λαμβάνει το πολυώνυμο $p(n)$ για την τιμή αυτή, δηλαδή $y[0] = p(0) = \alpha_0$. Αν $h_i[m]$ είναι το στοιχείο της μήτρας H που αντιστοιχεί στην i γραμμή και στην m στήλη, τότε

$$y[0] = \alpha_0 = \sum_{m=-M}^M h_0[m]x[m] \quad (4.13)$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση (4.13) με το δεξιό σκέλος της εξίσωσης (4.12) για $n = 0$, φαίνεται πως ότι οι συντελεστές του φίλτρου εξαρτώνται μόνο από το βαθμό N του πολυωνύμου και από το μήκος $F (= 2M + 1)$ του παραθύρου και είναι ανεξάρτητοι του σήματος στην είσοδό του.

Το φίλτρο Savitzky-Golay εκτός από ομαλοποίηση ενός σήματος καθιστά δυνατό τον υπολογισμό παραγώγων τάξης $i = 0, 1, \dots, N$ του σήματος αυτού.

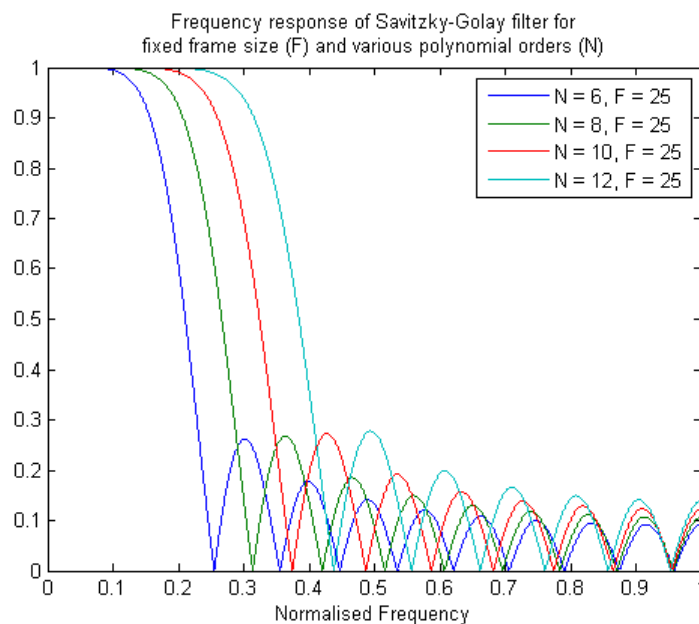
Ομοίως με προηγουμένως ισχύει για τις παραγώγους του σήματος εξόδου

$$y^{(i)}[0] = \left. \frac{d^i p}{dn^i} \right|_{n=0} = i! \alpha_i = i! \sum_{m=-M}^M h_i[m]x[m]$$

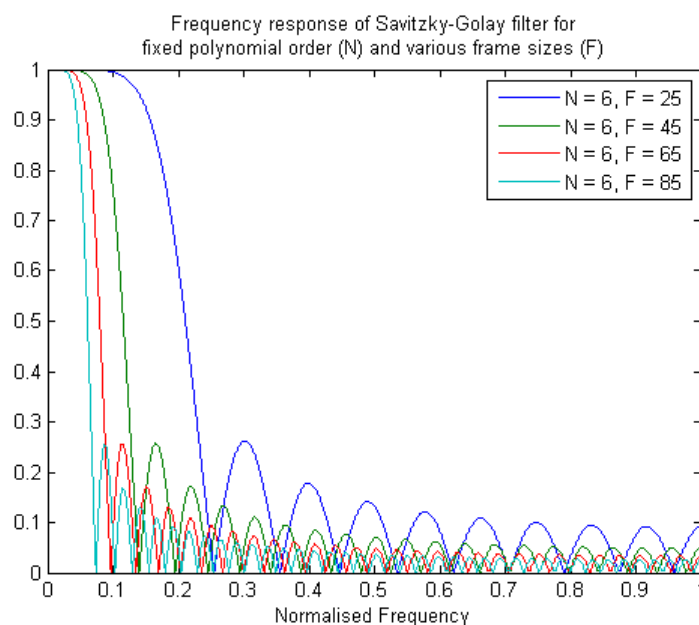
Μετατοπίζοντας την ανωτέρω εξίσωση κατά n δείγματα στο χρόνο προκύπτει η εξίσωση που δίνει τις εξόδους του φίλτρου

$$y^{(i)}[n] = i! \sum_{m=-M}^M h_i[-m]x[n-m] \quad , i = 0, 1, \dots, N \quad (4.14)$$

Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 φαίνεται η απόκριση συχνότητας του φίλτρου Savitzky-Golay για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνύμου N και για διαφορετικά μήκη παραθύρου F αντίστοιχα.



Σχήμα 4.8: Απόκριση συχνότητας του φίλτρου Savitzky-Golay για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνύμου N



Σχήμα 4.9: Απόκριση συχνότητας του φίλτρου Savitzky-Golay για διαφορετικά μήκη παραθύρου F

Φαίνεται επίσης ότι, όσο μειώνεται ο βαθμός του πολυωνύμου και όσο αυξάνεται το μέγεθος του παραθύρου, τόσο αυξάνεται η ομαλοποίηση που προκαλεί το φίλτρο, καθώς η πτώση του κεντρικού λοβού γίνεται σε χαμηλότερη συχνότητα και με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Οι πρώτες και οι τελευταίες M τιμές του σήματος στην είσοδο του φίλτρου, όπου $F = 2M + 1$ είναι το μήκος του παραθύρου που χρησιμοποιεί το φίλτρο, δεν μπορούν να προσεγγιστούν από αυτό, λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί. Για το λόγο αυτό, οι καταγραφές πρέπει να περιέχουν κάποια διαστήματα ακινησίας στην αρχή και στο τέλος τους, ούτως ώστε να μην υπάρξει αποκοπή χρήσιμης πληροφορίας από τις χρονοσειρές που φιλτράρονται.

Το φιλτράρισμα γίνεται για κάθε μια από τις έξι καταγεγραμμένες μεταβλητές ξεχωριστά και για κάθε μεταβλητή υπολογίζονται, εκτός από τη φιλτραρισμένη ποσότητα, η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της, καθώς αυτές μόνο χρησιμοποιούνται.

Ύστερα από υπολογισμό της φασματικής ισχύς των σημάτων που καταγράφηκαν, βρέθηκε ότι οι συχνότητες πάνω από 5 Hz για τις μεταβλητές θέσης και 20 Hz για τις μεταβλητές προσανατολισμού, δεν περιέχουν σημαντική πληροφορία και μπορούν να περικοπούν δίχως να επέλθει σημαντική αλλαγή στα σήματα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές και με βάση την απόκριση συχνότητας του φίλτρου, προσδιορίστηκαν οι επιθυμητές παράμετροι του N και F . Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τιμές $N = 8$ και $F = 81$ για τις μεταβλητές θέσης και οι τιμές $N = 8$ και $F = 21$ για τις μεταβλητές προσανατολισμού. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις εφαρμογές του φίλτρου στην παρούσα εργασία.

4.2.3 Εύρεση αρχής και πέρατος κίνησης

Για κάθε κίνηση που καταγράφηκε, ύστερα από την προεπεξεργασία και το φιλτράρισμα, ακολούθησε μια αλγοριθμική διαδικασία προσδιορισμού της αρχής και του πέρατος της. Η διαδικασία αυτή είναι αναγκαία ώστε να αφαιρεθούν από την καταγραφή τα αρχικά και τελικά δείγματα ακινησίας, αφενός επειδή είναι περιττά και αφετέρου επειδή επηρεάζουν τις διαδικασίες εκμάθησης και αναπαραγωγής των κινήσεων.

Στην περίπτωση των διακριτών κινήσεων, αρχικά υπολογίζεται το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας του αισθητήρα που εκτελεί την επιθυμητή κίνηση ως $v_j = \sqrt{\dot{x}_j^2 + \dot{y}_j^2 + \dot{z}_j^2}$ για κάθε καταγεγραμμένη δείγμα j της κίνησης, καθώς και η μέγιστη τιμή που λαμβάνει $v_{max} = \max_j \{v_j\}$. Ως αρχή της κίνησης λαμβάνεται το δείγμα για το οποίο το μέτρο της ταχύτητας ξεπερνά το 5% της τιμής v_{max} και στη συνέχεια αυξάνεται συνεχώς έως ότου λάβει την τιμή v_{max} , ενώ ως πέρας της κίνησης λαμβάνεται το δείγμα για το οποίο το μέτρο της ταχύτητας πέφτει κάτω από το 5% της τιμής v_{max} αφού έχει πρώτα λάβει την τιμή v_{max} ([25]). Ύστερα γίνεται διαγραφή των μετρήσεων για όλες τις μεταβλητές που αντιστοιχούν σε δείγματα τα οποία δεν ανήκουν στο ανωτέρω περιθώριο.

Στην περίπτωση των περιοδικών κινήσεων, εκτός από το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας του αισθητήρα που εκτελεί την επιθυμητή κίνηση, υπολογίζεται και το μέτρο της γραμμικής επιτάχυνσης του ως $a_j = \sqrt{\ddot{x}_j^2 + \ddot{y}_j^2 + \ddot{z}_j^2}$ για κάθε καταγεγραμμένη δείγμα j της κίνησης, κα-

θώς και η μέγιστη τιμή που λαμβάνει $a_{max} = \max_j \{a_j\}$. Ως αρχή της κίνησης λαμβάνεται το δείγμα για το οποίο το μέτρο της ταχύτητας ξεπερνά το 5% της τιμής v_{max} και στη συνέχεια αυξάνεται συνεχώς έως ότου ξεπεράσει το 50% της τιμής v_{max} , ενώ ως πέρας της κίνησης λαμβάνεται το δείγμα για το οποίο το μέτρο της ταχύτητας και το μέτρο της επιτάχυνσης πέφτουν κάτω από το 5% των τιμών v_{max} και a_{max} αντίστοιχα. Έπτερα γίνεται διαγραφή των μετρήσεων για όλες τις μεταβλητές που αντιστοιχούν σε δείγματα τα οποία δεν ανήκουν στο ανωτέρω περιθώριο.

Για κάθε περιεχομένη κίνηση υπολογίζεται το διάστημα χρόνου, το οποίο αποτελείται από τις χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν στις τιμές των έξι καταγεγραμμένων μεταβλητών που διατηρήθηκαν. Από κάθε τιμή του διαστήματος αυτού αφαιρείται η πρώτη του τιμή, ώστε η κίνηση να ξεκινά από μηδενικό χρόνο και να τερματίζεται σε χρόνο ίσο με την τελευταία τιμή του διαστήματος.

4.3 Εκτέλεση κινήσεων από ρομπότ

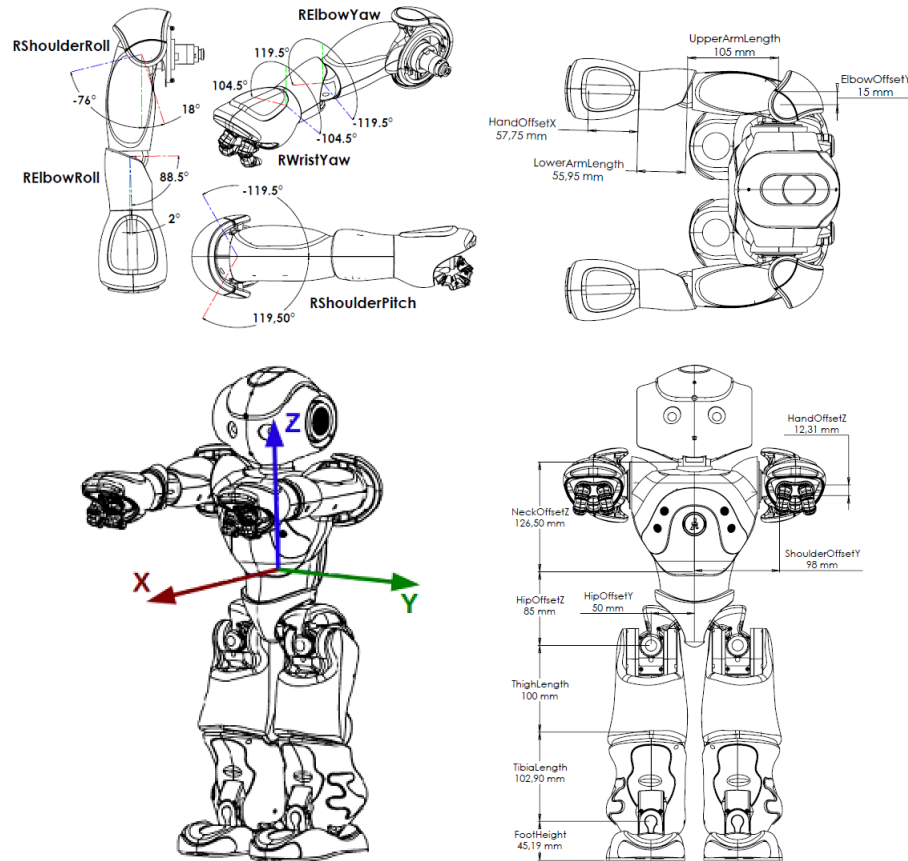
4.3.1 Ανθρωπόμορφο ρομπότ NAO

Για την υλοποίηση των χειρονομιών στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται το ανθρωπόμορφο ρομπότ NAO της εταιρείας SoftBank Robotics το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Το ρομπότ αυτό διαθέτει 5 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε χέρι έως την παλάμη. Διαθέτει επίσης ένα βαθμό ελευθερίας για την ταυτόχρονη κίνηση των τριών δακτύλων (άνοιγμα-κλείσιμο) ο οποίος δεν χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της εργασίας.

Το ρομπότ NAO επιλέχθηκε καθώς ο λόγος των διαστάσεων των τμημάτων των χεριών του είναι συγκρίσιμος με το λόγο των διαστάσεων των τμημάτων των χεριών ενός ανθρώπου και επειδή διαθέτει αρκετούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε χέρι ώστε να είναι ικανό να αναπαράγει τις επιθυμητές κινήσεις με μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με την ανθρώπινη επίδειξη. Η εταιρεία SoftBank Robotics παρέχει το λογισμικό Choregraphe μέσω του οποίου προγραμματίζεται το φυσικό ρομπότ ή ένα εικονικό ρομπότ σε γλώσσα Python, διευκολύνοντας έτσι την εργασία με αυτό.

4.3.2 Περιβάλλον προσομοίωσης Choregraphe

Το λογισμικό Choregraphe επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο διαφόρων στοιχείων δράσης του ρομπότ (αριστερό και δεξί χέρι και πόδι, κεφάλι και κορμός) από το χρήστη με την παροχή των αντίστοιχων πινάκων θέσης διάστασης $N \times 6$, όπου N ο αριθμός των σημείων της επιθυμητής τροχιάς για κάθε στοιχείο δράσης. Κάθε γραμμή κάθε πίνακα είναι της μορφής $P = [x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]$, όπου x , y και z η θέση του στοιχείου δράσης στους άξονες του συστήματος αναφοράς του κορμού του ρομπότ σε μέτρα και θ_x , θ_y και θ_z οι γωνίες Euler του



Σχήμα 4.10: Διαστάσεις και σύστημα αναφοράς του ανθρωπόμορφου ρομπότ NAO

προσανατολισμού του στοιχείου δράσης σε σχέση με το ίδιο σύστημα αναφοράς σε ακτίνα. Το σύστημα αναφοράς του κορμού του ρομπότ NAO φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Ο χρήστης παρέχει επίσης ένα πίνακα χρόνου διάστασης $N \times 1$ ο οποίος περιέχει τις χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν σε κάθε γραμμή P του πίνακα θέσης για κάθε στοιχείο δράσης. Το λογισμικό αναλαμβάνει τον υπολογισμό των ταχυτήτων των αρθρώσεων του ρομπότ ώστε το αντίστοιχο στοιχείο δράσης να βρίσκεται στις δοσμένες θέσεις κατά τις δοσμένες χρονικές στιγμές.

Το γεγονός πως το ανθρώπινο χέρι διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας μέχρι την παλάμη (για τις ανάγκες της εργασίας δεν χρησιμοποιούνται οι βαθμοί ελευθερίας που συνδέονται με την κίνηση των δακτύλων) δύναται να περιορίσει τη δυνατότητα και την ακρίβεια αναπαραγωγής κάποιας κίνησης από το ρομπότ. Για το λόγο αυτό υπάρχει η δυνατότητα ο χρήστης να επιλέξει ποιες από τις 6 μεταβλητές (3 μεταβλητές θέσης σε κάθε άξονα και 3 μεταβλητές προσανατολισμού υπό μορφή γωνιών Euler) είναι περιορισμένες και ποιες όχι, δηλαδή ποιες μεταβλητές θα ακολουθηθούν πιστά κατά την κίνηση του χεριού και ποιες είναι ελεύθερες να πάρουν τις κατάλληλες τιμές ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας κρίθηκε αναγκαίος ο έλεγχος των μεταβλητών

θέσης x , y και z , ώστε να ακολουθηθούν πιστά οι επιθυμητές τροχιές των δύο χεριών. Κρίθηκε επίσης αναγκαίος ο έλεγχος της γωνίας θ_x , η οποία σχετίζεται με την περιστροφή του καρπού γύρω από τον άξονα που ενώνει τον αγκώνα με τον καρπό και της οποίας η μεταβολή δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τροχιά που ακολουθεί το χέρι του ρομπότ. Οι γωνίες θ_y και θ_z δεν περιορίζονται. Με τις παραδοχές αυτές η μορφή της κίνησης που παράγει το ρομπότ πλησιάζει τη μορφή της καταγεγραμμένης κίνησης αλλά υπάρχει κάποια απόκλιση.

4.3.3 Μετατροπή των δεδομένων κίνησης από το ανθρώπινο μοντέλο στο μοντέλο του ρομπότ NAO

Για να είναι σε θέση το ρομπότ να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα κίνησης που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου DMP είναι απαραίτητη η μετατροπή των δεδομένων αυτών από ανθρώπινη κίνηση, με βάση το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για το χώρο διενέργειας των μετρήσεων, σε κίνηση ρομπότ NAO, με βάση το σύστημα αναφοράς του κορμού του ρομπότ.

Οι μεταβλητές προσανατολισμού παραμένουν οι ίδιες για τα δύο περιβάλλοντα (άνθρωπος, ρομπότ) επειδή ο σχετικός προσανατολισμός των δύο συστημάτων αναφοράς παραμένει σταθερός. Για τη μετατροπή των μεταβλητών θέσης χρησιμοποιούνται τέσσερα βοηθητικά συστήματα αναφοράς, τα οποία έχουν τον ίδιο προσανατολισμό με τα συστήματα αναφοράς του κορμού του ρομπότ και του χώρου διενέργειας των μετρήσεων και τα κέντρα τους βρίσκονται στις αρθρώσεις των ώμων του ρομπότ και του μελετητή.

Τα κέντρα των συστημάτων αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην ακόλουθη ανάλυση για το σώμα του ανθρώπου και το σώμα του ρομπότ NAO παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.11.

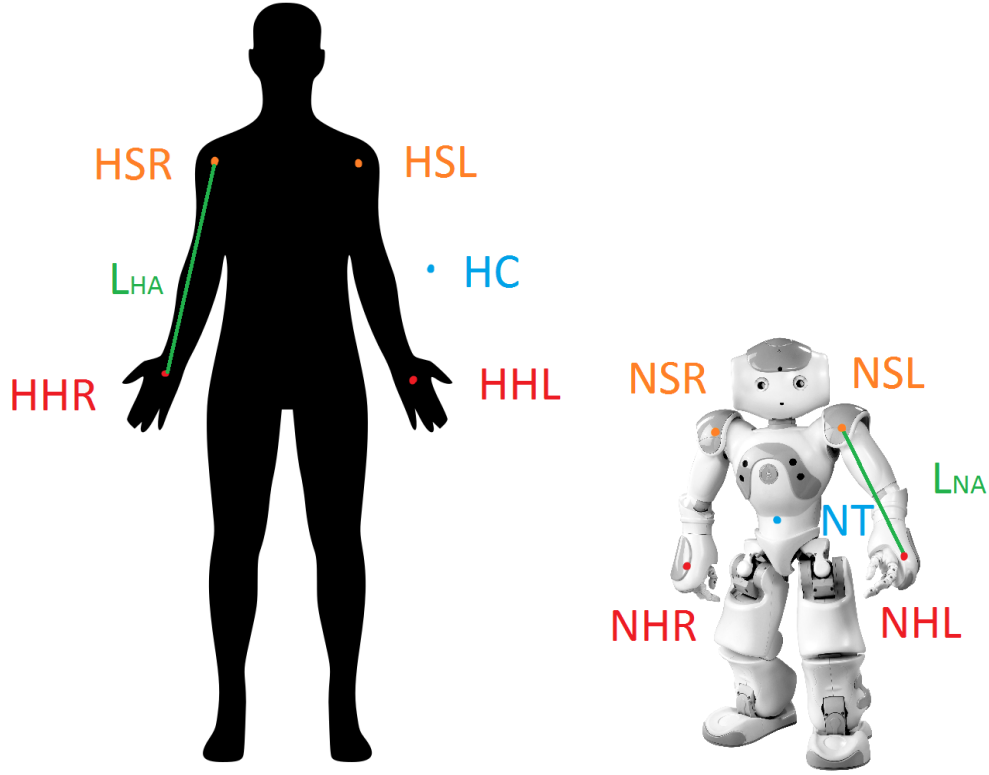
Τα διανύσματα θέσης \mathbf{p} των δύο χεριών του ρομπότ (NHR για το δεξί και NHL για το αριστερό) στο σύστημα αναφοράς του κορμού του ρομπότ (NT) δίνονται από τις εξισώσεις

$$\mathbf{p}_{NHR}^{NT} = \mathbf{p}_{NHR}^{NSR} + \mathbf{d}_{NSR}^{NT}$$

και

$$\mathbf{p}_{NHL}^{NT} = \mathbf{p}_{NHL}^{NSL} + \mathbf{d}_{NSL}^{NT}$$

για το δεξί και το αριστερό χέρι αντίστοιχα, όπου \mathbf{p}_{NHR}^{NSR} και \mathbf{p}_{NHL}^{NSL} τα διανύσματα θέσης του δεξιού και του αριστερού χεριού του ρομπότ στο σύστημα αναφοράς του αντίστοιχου ώμου του ρομπότ και \mathbf{d}_{NSR}^{NT} και \mathbf{d}_{NSL}^{NT} τα διανύσματα θέσης των συστημάτων αναφοράς του δεξιού και του αριστερού ώμου του ρομπότ σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του κορμού



Σχήμα 4.11: Κέντρα συστημάτων αναφοράς και μήκη χεριών για το ανθρώπινο σώμα (αριστερά) και το σώμα του ρομπότ NAO (δεξιά)

του ρομπότ.

Τα διανύσματα θέσης \mathbf{p} των δύο χεριών του μελετητή (HHR για το δεξί και HHL για το αριστερό) στα συστήματα αναφοράς των ώμων του (HSR για τον δεξί και HSL για τον αριστερό) δίνονται από τις εξισώσεις

$$\mathbf{p}_{HHR}^{HSR} = \mathbf{p}_{HHR}^{HC} - \mathbf{d}_{HSR}^{HC}$$

και

$$\mathbf{p}_{HHL}^{HSL} = \mathbf{p}_{HHL}^{HC} - \mathbf{d}_{HSL}^{HC}$$

για το δεξί και το αριστερό χέρι αντίστοιχα, όπου \mathbf{p}_{HHR}^{HC} και \mathbf{p}_{HHL}^{HC} τα διανύσματα θέσης του δεξιού και του αριστερού χεριού του μελετητή στο σύστημα αναφοράς του χώρου διενέργειας των μετρήσεων και \mathbf{d}_{HSR}^{HC} και \mathbf{d}_{HSL}^{HC} τα διανύσματα θέσης των συστημάτων αναφοράς του δεξιού και του αριστερού ώμου του μελετητή σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του χώρου διενέργειας των μετρήσεων.

Γίνεται επίσης μια κλιμάκωση μεταξύ του περιβάλλοντος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος του ρομπότ. Η κλιμάκωση αυτή ορίζεται ως

$$\frac{L^{NA}}{L^{HA}}$$

όπου L^{NA} το μήκος του χεριού του ρομπότ από τον ώμο μέχρι την παλάμη και L^{HA} το μήκος του χεριού του μελετητή από τον ώμο μέχρι την παλάμη (Σχήμα 4.11). Με τη χρήση αυτής της ποσότητας γεφυρώνονται τα δύο περιβάλλοντα από τις εξισώσεις

$$\mathbf{p}_{NHR}^{NSR} = \frac{L^{NA}}{L^{HA}} \cdot \mathbf{p}_{HHR}^{HSR}$$

και

$$\mathbf{p}_{NHL}^{NSL} = \frac{L^{NA}}{L^{HA}} \cdot \mathbf{p}_{HHL}^{HSL}$$

για το δεξί και το αριστερό χέρι αντίστοιχα. Εν τέλει τα διανύσματα θέσης \mathbf{p} που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση υπολογίζονται από τις εξισώσεις

$$\mathbf{p}_{NHR}^{NT} = \frac{L^{NA}}{L^{HA}} \cdot (\mathbf{p}_{HHR}^{HC} - \mathbf{d}_{HSR}^{HC}) + \mathbf{d}_{NSR}^{NT}$$

και

$$\mathbf{p}_{NHL}^{NT} = \frac{L^{NA}}{L^{HA}} \cdot (\mathbf{p}_{HHL}^{HC} - \mathbf{d}_{HSL}^{HC}) + \mathbf{d}_{NSL}^{NT}$$

για το δεξί και το αριστερό χέρι αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την τεκμηρίωση της εταιρείας SoftBank Robotics (<http://doc.aldebaran.com>) για την έκδοση 4.0 του ρομπότ NAO, ισχύουν

$$L^{NA} = 0.2187 m$$

$$\mathbf{d}_{NSR}^{NT} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.098 \\ 0.1 \end{bmatrix} m$$

$$\mathbf{d}_{NSL}^{NT} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.098 \\ 0.1 \end{bmatrix} m \quad ,$$

ενώ από μετρήσεις με χρήση των αισθητήρων προκύπτουν τα αντίστοιχα προσεγγιστικά μεγέθη για το περιβάλλον του μελετητή

$$L^{HA} = 0.68 m$$

$$\mathbf{d}_{HSR}^{HC} = \begin{bmatrix} -0.4 \\ -0.2 \\ 0.3 \end{bmatrix} m$$

$$\mathbf{d}_{HSL}^{HC} = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.2 \\ 0.3 \end{bmatrix} m \quad .$$

Στα [12] και [24] παρουσιάζονται δύο μέθοδοι που επιτρέπουν σε ανθρωπόμορφα ρομπότ να μιμηθούν μια κίνηση που πραγματοποιεί ένας άνθρωπος και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, η οποία όμως τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε γιατί προϋπέθετε τη γνώση της θέσης του αγκώνα του ανθρώπου εκτός από τη θέση του ώμου και του χεριού του, πληροφορία η οποία δεν ήταν διαθέσιμη στην παρούσα υλοποίηση.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά Αποτελέσματα

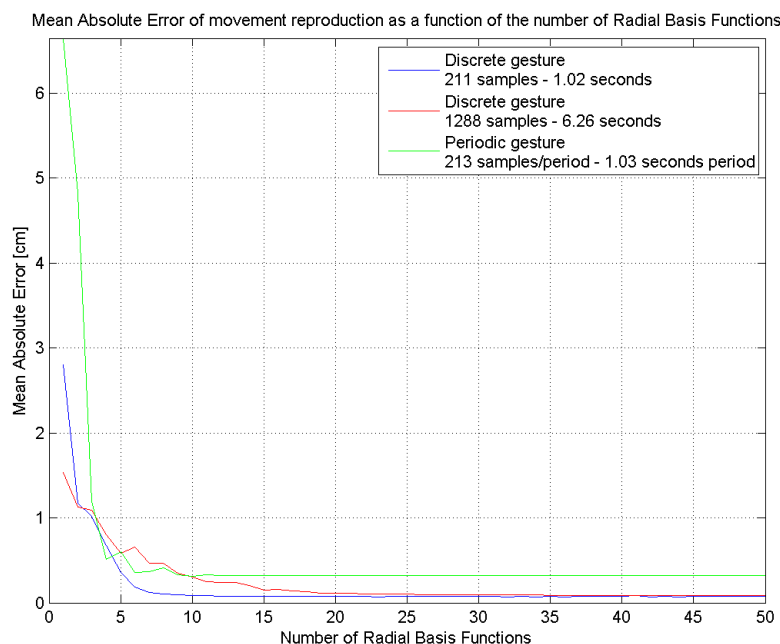
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Αρχικά περιγράφεται η επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιεί το μοντέλο DMP. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τροχιές που καταγράφηκαν για κάθε κίνηση και συγκρίνονται με τις γενικευμένες τροχιές που υπολογίστηκαν για κάθε είδος κίνησης που καταγράφηκε. Παράλληλα με τις τροχιές, παρουσιάζονται στιγμιότυπα της εκτέλεσης κάθε κίνησης από τη ρομποτική διάταξη ΝΑΟ στο περιβάλλον προσομοίωσης Choregraphe. Η υλοποίηση όλων των μεθόδων και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του προγράμματος MATLAB.

5.1 Επιλογή παραμέτρων μοντέλου DMP

Ακολούθως δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου DMP που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων:

- Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η τιμή της παραμέτρου α_z των εξισώσεων (2.7) και (2.17) επιλέγεται ως $\alpha_z = 4\beta_z$, επομένως χρειάζεται μόνο ο προσδιορισμός της παραμέτρου β_z ώστε να είναι δυνατή η χρήση των εξισώσεων αυτών.
- Η τιμή της μεταβλητής β_z επιλέχθηκε ώστε η εξίσωση (2.12), να δίνει σύγκλιση της μεταβλητής y κατά 95% στην τιμή g , όταν $t = \tau$ ([20]). Αυτό επιτυγχάνεται όταν $\beta_z = 2,4$.
- Για την παράμετρο α_x της εξίσωσης (2.4) επιλέχθηκε η τιμή $\alpha_x = 4,6$, η οποία δίνει $x(\tau) = 0,01$ στην εξίσωση (2.5). Η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου α_x δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη χρονική εξέλιξη της κίνησης και τη σύγκλιση της μεταβλητής y στην τιμή g .
- Για τον αριθμό των ακτινικών συναρτήσεων βάσης επιλέχθηκε η τιμή $N = 25$ ([23], [7]). Όστερα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε καταγεγραμμένες κινήσεις, βρέθηκε ότι για $N < 25$ δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ακρίβεια στην προσέγγιση της

συνάρτησης f , ενώ για $N > 25$ αυξάνεται η πολυπλοκότητα των υπολογισμών δίχως να μειώνεται αισθητά το σφάλμα προσέγγισης.



Σχήμα 5.1: Μέσο απόλυτο σφάλμα μεταξύ καταγραφής και αναπαραγωγής συναρτήσεων του αριθμού των ακτινικών συναρτήσεων βάσης για μια διακριτή κίνηση μικρής διάρκειας (μπλε), μια διακριτή κίνηση μεγαλύτερης διάρκειας (κόκκινο) και μια περιοδική κίνηση (πράσινο)

Η καταλληλότητα της επιλογής του αριθμού των ακτινικών συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται και στο Σχήμα 5.1. Στο Σχήμα αυτό φαίνεται το μέσο απόλυτο σφάλμα μεταξύ μιας καταγραφής και της αναπαραγωγής που προέκυψε από τη διδασκαλία της, συναρτήσει του αριθμού των ακτινικών συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιήθηκαν, για 3 διαφορετικές κινήσεις. Οι 3 κινήσεις που εξετάστηκαν ήταν μια διακριτή κίνηση μικρής διάρκειας, μια διακριτή κίνηση μεγαλύτερης διάρκειας και μια περιοδική κίνηση.

Ο αριθμός των ακτινικών συναρτήσεων βάσης περιορίζεται επίσης από τον αριθμό των δειγμάτων από τα οποία αποτελείται μια επίδειξη. Στις περισσότερες καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν, ο αριθμός των δειγμάτων δεν ξεπερνούσε τα 400 δείγματα. Στην περίπτωση των περιοδικών κινήσεων επίσης δεν ξεπερνούσε τα 400 δείγματα ανά περίοδο κίνησης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι περισσότερες κινήσεις είχαν την ίδια διάρκεια και αντίστοιχη περίοδο, γεγονός που σε συνδυασμό με τα δεδομένα του Σχήματος 5.1 επιτρέπει τη χρήση του ιδίου αριθμού ακτινικών συναρτήσεων βάσης καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

Οι παράμετροι $\alpha_z = 9,6$, $\beta_z = 2,4$, $\alpha_x = 4,6$ και $N = 25$ παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της εξαγωγής αποτελεσμάτων.

5.2 Αποτελέσματα διακριτών κινήσεων ενός χεριού

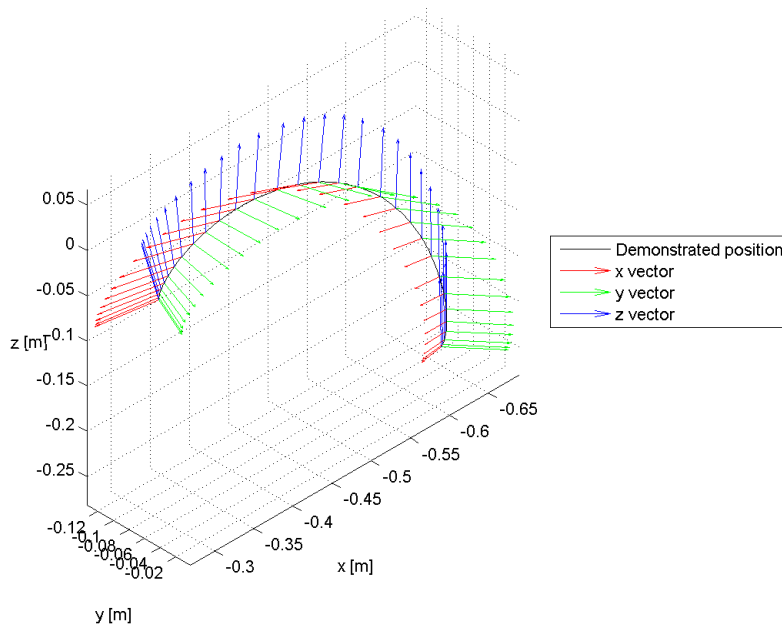
Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών διδασκαλίας και γενίκευσης για μια διακριτή κίνηση και συγκεκριμένα για μια δεικτική χειρονομία η οποία εκτελέστηκε με το δεξί χέρι, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3 για τις διακριτές κινήσεις.

5.2.1 Δεικτική κίνηση

5.2.1.1 Καταγεγραμμένη κίνηση

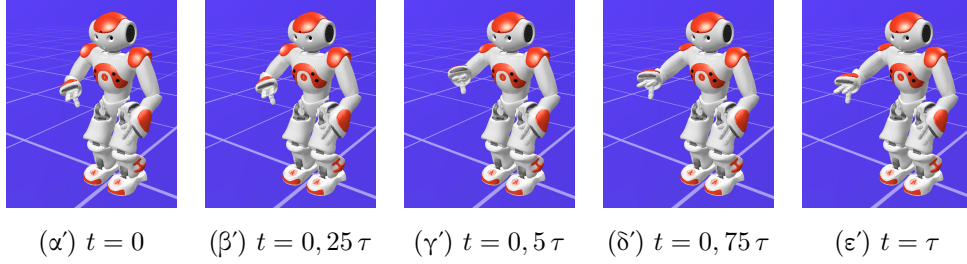
Αρχικά παρουσιάζονται η καταγεγραμμένη τροχιά του αισθητήρα του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.2.

3D plot of the demonstrated trajectory of the right hand with vectors of its reference frame



Σχήμα 5.2: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για δεικτική κίνηση

Στη συνέχεια οι 6 καταγεγραμμένες μεταβλητές της κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ ΝΑΟ, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ ΝΑΟ μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.3 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης δεικτικής κίνησης που καταγράφηκε.



Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

5.2.1.2 Γενικευμένη κίνηση

Για τη γενίκευση της κίνησης, όλες οι παράμετροι επιλέγονται ίδιες με εκείνες της κίνησης που διδάχθηκε, εκτός από την παράμετρο g που αντιστοιχεί στη μεταβλητή θέσης στον άξονα y . Η παράμετρος αυτή επιλέγεται τέτοια ώστε η ποσότητα $(g - y_0)$ να κλιμακώνεται κατά έναν επιλεγμένο συντελεστή σε σχέση με την αρχική κίνηση. Ισχύει δηλαδή

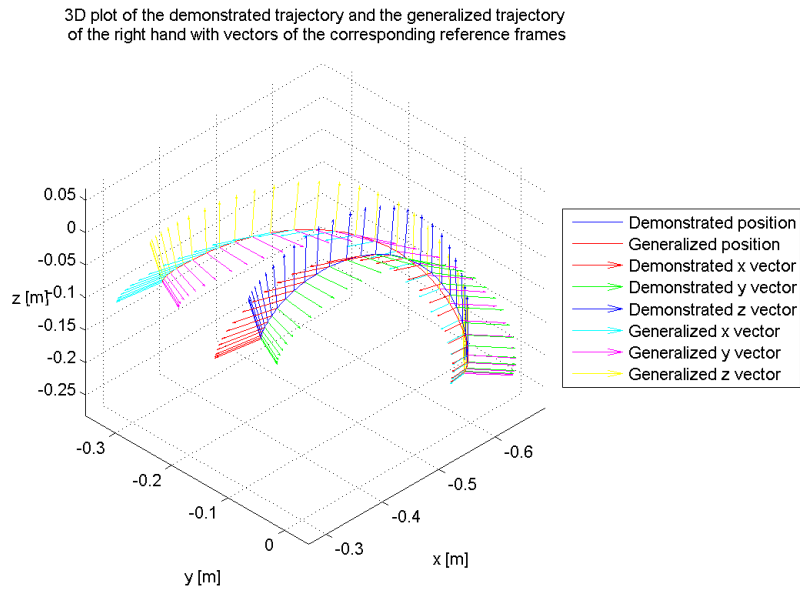
$$\tau^{new} = \tau^{old} \quad , \quad \begin{bmatrix} y_{0,x}^{new} \\ y_{0,y}^{new} \\ y_{0,z}^{new} \\ y_{0,\theta_x}^{new} \\ y_{0,\theta_y}^{new} \\ y_{0,\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{old} \\ y_{0,y}^{old} \\ y_{0,z}^{old} \\ y_{0,\theta_x}^{old} \\ y_{0,\theta_y}^{old} \\ y_{0,\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} g_x^{new} \\ g_y^{new} \\ g_z^{new} \\ g_{\theta_x}^{new} \\ g_{\theta_y}^{new} \\ g_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^{old} \\ 3 \cdot (g_y^{old} - y_{0,y}^{old}) + y_{0,y}^{new} \\ g_z^{old} \\ g_{\theta_x}^{old} \\ g_{\theta_y}^{old} \\ g_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια χωρικά κλιμακωμένη κίνηση παρόμοια με την αρχική, η οποία έχει την ίδια διάρκεια.

Με βάση την αρχική επίδειξη της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται η νέα τροχιά του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.4, όπου και συγκρίνονται με την αρχική τροχιά και το αρχικό σύστημα αναφοράς.

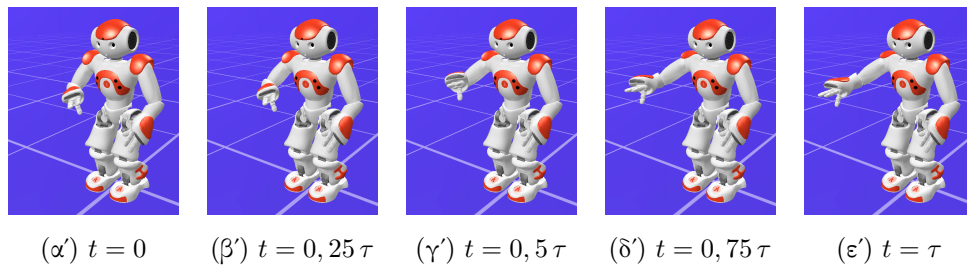
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, η γενίκευση παράγει μια κίνηση μορφολογικά όμοια με την αρχική, η οποία δύναται να κλιμακωθεί τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Στη συνέχεια οι 6 μεταβλητές που υπολογίστηκαν κατά τη γενίκευση της κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης γενικευμένης



Σχήμα 5.4: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για δεικτική κίνηση

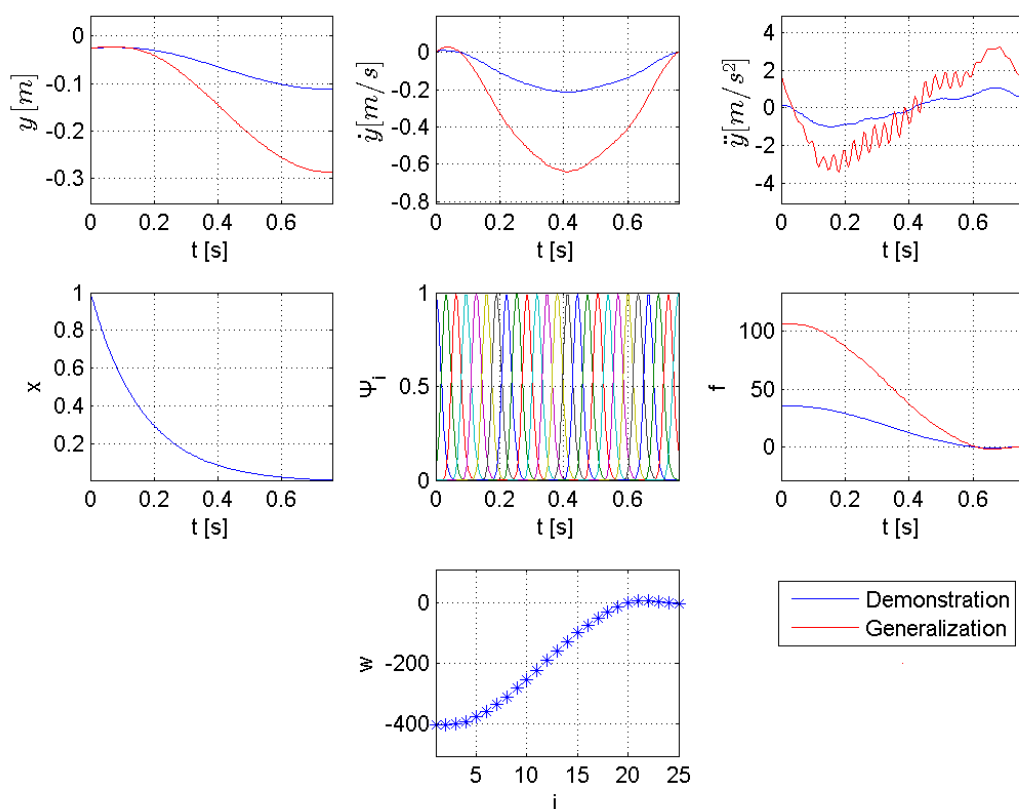
δεικτικής κίνησης.



Σχήμα 5.5: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25 \tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5 \tau$ (κέντρο), $t = 0,75 \tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι σχετικές μεταβλητές και συναρτήσεις για τη διδασκαλία και τη γενίκευση της δεικτικής κίνησης, οι οποίες αντιστοιχούν στη μεταβλητή θέσης για τον άξονα y .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, οι τιμές των συναρτήσεων f στο τέλος της κίνησης συγκλίνουν στην τιμή 0, γεγονός που συνάδει με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

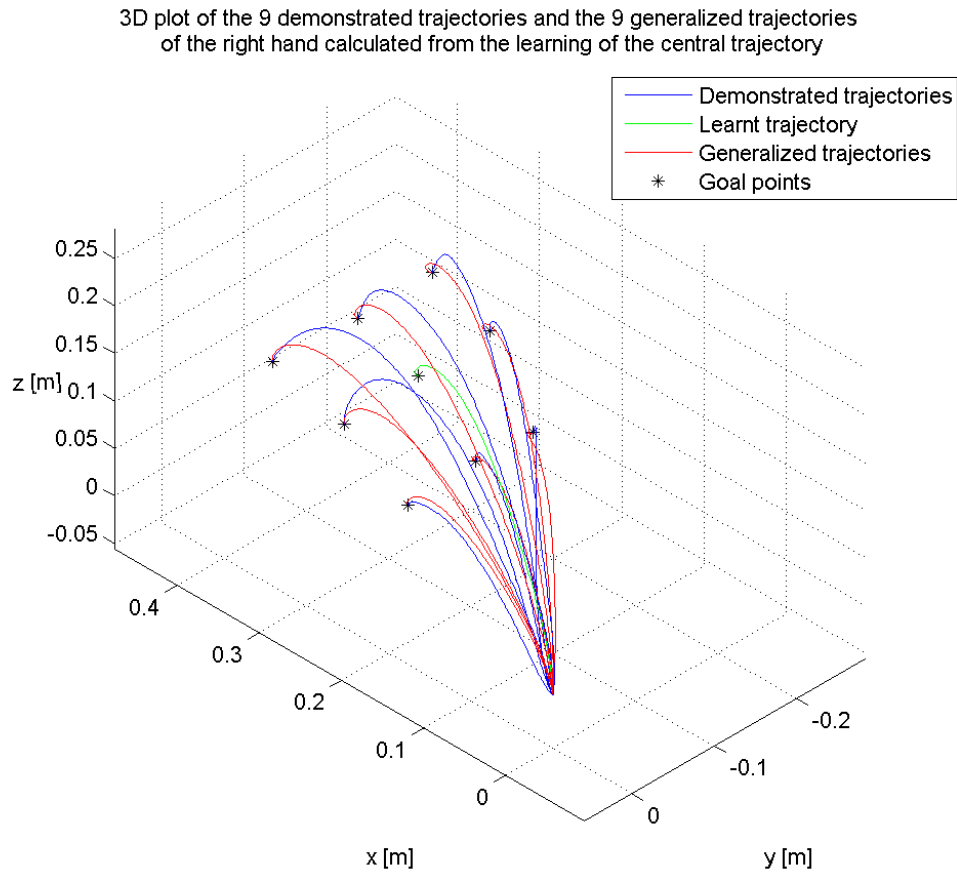


Σχήμα 5.6: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y σε μια διακριτή δεικτική κίνηση. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)

Τέλος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μεταβλητή x και οι συναρτήσεις Ψ_i είναι κοινές για τις μεταβλητές θέσης και για τις μεταβλητές προσανατολισμού.

5.2.1.3 Σύγκριση καταγεγραμμένων και γενικευμένων κινήσεων

Προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο ακριβής είναι η μέθοδος γενίκευσης που προτάθηκε και υλοποιήθηκε, καταγράφηκε μια σειρά δεικτικών χειρονομιών με ίδιο σημείο αρχής και διαφορετικά σημεία πέρατος (στόχους). Συνολικά καταγράφηκαν 9 χειρονομίες, των οποίων οι στόχοι ήταν διατεταγμένοι σε ένα δισδιάστατο πλέγμα και απείχαν περίπου 10 cm σε κάθε διάσταση από τους γειτονικούς στόχους. Ως επίδειξη προς διδασκαλία επιλέχθηκε η κεντρική ως προς τις δύο διαστάσεις. Με βάση αυτή την επίδειξη υπολογίστηκαν οι γενικευμένες κινήσεις που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες 8 επιδείξεις, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση καταγεγραμμένων τροχιών (μπλε) και των αντίστοιχων γενικευμένων τροχιών (κόκκινο) του δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο για μια δεικτική χερονομία. Απεικονίζεται επίσης η διδασκόμενη τροχιά (πράσινο)

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται πως οι γενικευμένες τροχιές είναι μορφολογικά όμοιες με τις καταγεγραμμένες τροχιές και επιπλέον ξεκινούν και τελειώνουν στα ίδια σημεία. Φαίνεται επίσης πως κατά την εξέλιξη της κίνησης υπάρχει μια απόκλιση μεταξύ καταγραφής και γενίκευσης, η οποία οφείλεται αφενός στην αυθαίρετη πολυπλοκότητα κάθε κίνησης και αφετέρου στη μεταβλητότητα που εισάγει η επίδειξη από άνθρωπο σε κάθε κίνηση. Για την ποσοτική σύγκριση μεταξύ καταγραφής και γενίκευσης, υπολογίστηκαν τα μέσα απόλυτα σφάλματα (σε cm) μεταξύ των τροχιών κάθε επίδειξης και κάθε γενίκευσης για τους 3 χωρικούς άξονες, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Για τον ποσοτικό έλεγχο της μεταβλητότητας της ανθρώπινης κίνησης, καταγράφηκαν και άλλες 2 επιδείξεις για κάθε μια από τις 9 χειρονομίες. Για κάθε χειρονομία υπολογίστηκε το μέσο απόλυτο σφάλμα (σε cm) μεταξύ της καταγεγραμμένης τροχιάς που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση στον Πίνακα 5.1 και των υπολοίπων 2 καταγεγραμμένων τροχιών που καταγράφηκαν, για τους 3 χωρικούς άξονες και ελήφθη η μέγιστη από τις 2 τιμές. Οι τιμές των

Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (cm)	Αριστερά	Κέντρο	Δεξιά
Μπροστά	1.182	1.497	1.136
Κέντρο	1.702	0.074	0.473
Πίσω	1.198	0.534	0.699

Πίνακας 5.1: Μέσο απόλυτο σφάλμα γενίκευσης μιας διακριτής δεικτικής κίνησης

σφαλμάτων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (cm)	Αριστερά	Κέντρο	Δεξιά
Μπροστά	0.873	1.365	0.556
Κέντρο	2.103	0.815	1.194
Πίσω	0.660	1.022	0.911

Πίνακας 5.2: Μέσο απόλυτο σφάλμα μεταβλητότητας της ανθρώπινης κίνησης για μια διακριτή δεικτική κίνηση

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1 η γενίκευση που αντιστοιχεί στην επίδειξη που χρησιμοποιήθηκε για μάθηση παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό σφάλμα, όπως ήταν αναμενόμενο. Τα σφάλματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι της τάξης του 1 cm και είναι αποδεκτά μικρά, ειδικά αν συνυπολογιστεί το γεγονός πως το μήκος της τροχιάς της κίνησης που χρησιμοποιήθηκε για τη διδασκαλία είναι περίπου 35 cm και πως τα σφάλματα που οφείλονται στη μεταβλητότητα της ανθρώπινης κίνησης (Πίνακας 5.2) κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Παρατηρείται μάλιστα πως στις μισές σχεδόν περιπτώσεις, τα σφάλματα λόγω μεταβλητότητας της ανθρώπινης κίνησης είναι μεγαλύτερα από τα σφάλματα γενίκευσης, γεγονός που αποδεικνύει την καταλληλότητα της υλοποιημένης μεθόδου για την εκπαίδευση χειρονομιών.

5.3 Αποτελέσματα περιοδικών κινήσεων ενός χεριού

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών διδασκαλίας και γενίκευσης για μια περιοδική κίνηση και συγκεκριμένα για μια δυναμική σηματοφορική χειρονομία χαιρετισμού η οποία εκτελέστηκε με το δεξί χέρι, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3 για τις περιοδικές κινήσεις.

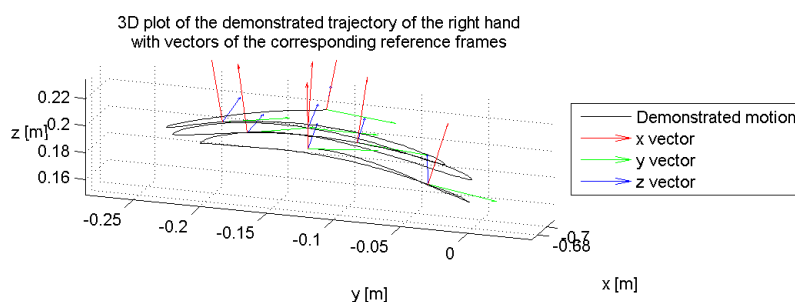
5.3.1 Χειρονομία χαιρετισμού

Η κίνηση που επιλέχθηκε για την καταγραφή έχει τη μορφή ταλάντωσης γύρω από ένα κεντρικό σημείο σε όλους τους χωρικούς άξονες. Ο αριθμός των περιόδων της ταλάντωσης επιλέχθηκε αρκετά μεγάλος ($M \geq 3$) ώστε να ομαλοποιούνται οι διάφορες αποκλίσεις που υπάρχουν κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης f κυρίως κατά την αρχή και το πέρας της

κίνησης, αλλά και αρκετά μικρός ($M \leq 5$) ώστε η περίοδος της ταλάντωσης να μην παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις, οι οποίες δημιουργούν αποκλίσεις στη συνάρτηση f .

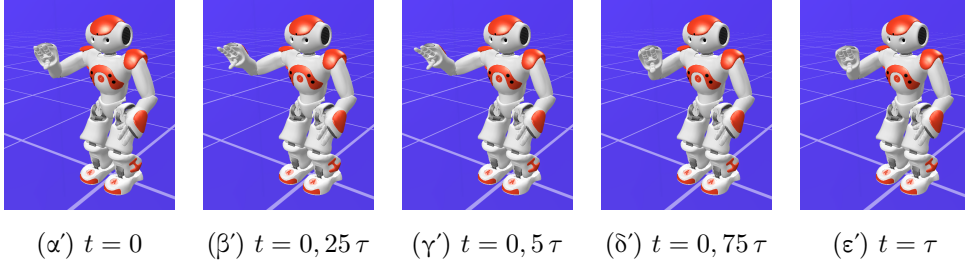
5.3.1.1 Καταγεγραμμένη κίνηση

Αρχικά παρουσιάζονται η καταγεγραμμένη τροχιά του αισθητήρα του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα σε ισοκαταναμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για χειρονομία χαιρετισμού

Στη συνέχεια οι 6 καταγεγραμμένες μεταβλητές της κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης χειρονομίας χαιρετισμού που καταγράφηκε. Η περίοδος της κίνησης συμβολίζεται με τ ($= \frac{2\pi}{\Omega}$).



Σχήμα 5.9: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας χαιρετισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

5.3.1.2 Γενικευμένη κίνηση

Για τη γενίκευση της κίνησης, όλες οι παράμετροι επιλέγονται ίδιες με εκείνες της κίνησης που διδάχθηκε, εκτός από την παράμετρο Ω και την παράμετρο r που αντιστοιχεί στη μεταβλητή θέσης στον άξονα y . Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται κλιμακωμένες κατά έναν επιλεγμένο συντελεστή σε σχέση με την αρχική κίνηση. Ισχύει δηλαδή

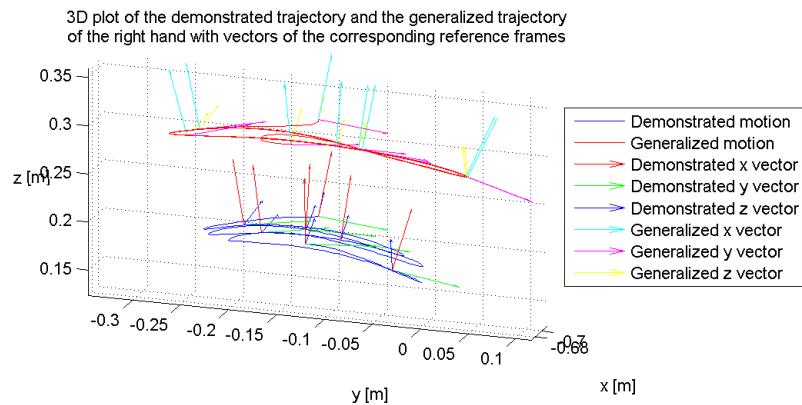
$$\Omega^{new} = 2 \cdot \Omega^{old}, \quad \begin{bmatrix} y_{0,x}^{new} \\ y_{0,y}^{new} \\ y_{0,z}^{new} \\ y_{0,\theta_x}^{new} \\ y_{0,\theta_y}^{new} \\ y_{0,\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{old} \\ y_{0,y}^{old} \\ y_{0,z}^{old} \\ y_{0,\theta_x}^{old} \\ y_{0,\theta_y}^{old} \\ y_{0,\theta_z}^{old} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} g_x^{new} \\ g_y^{new} \\ g_z^{new} \\ g_{\theta_x}^{new} \\ g_{\theta_y}^{new} \\ g_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^{old} \\ g_y^{old} \\ g_z^{old} \\ g_{\theta_x}^{old} \\ g_{\theta_y}^{old} \\ g_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} r_x^{new} \\ r_y^{new} \\ r_z^{new} \\ r_{\theta_x}^{new} \\ r_{\theta_y}^{new} \\ r_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x^{old} \\ 1.5 \cdot r_y^{old} \\ r_z^{old} \\ r_{\theta_x}^{old} \\ r_{\theta_y}^{old} \\ r_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια ταλάντωση, η οποία έχει τη διπλάσια συχνότητα και διαφορετικό πλάτος από την αρχική κίνηση, αλλά το ίδιο κέντρο και το ίδιο σημείο αρχής με αυτή.

Με βάση την αρχική επίδειξη της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται η νέα τροχιά του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.10, όπου και συγκρίνονται με την αρχική τροχιά και το αρχικό σύστημα αναφοράς.

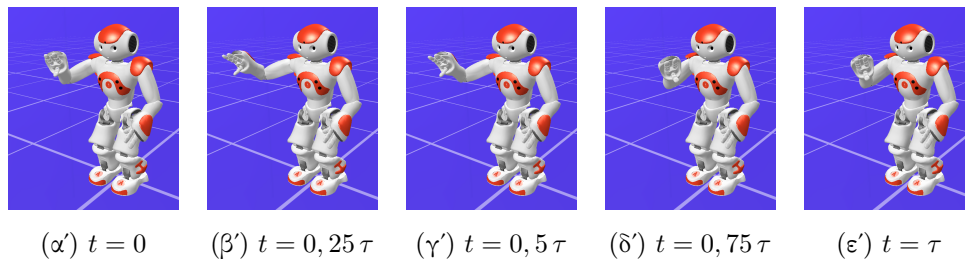
Στο Σχήμα 5.10 η γενικευμένη τροχιά έχει μετατοπιστεί κατά 0.1 m στον άξονα z ώστε να είναι ορατή δίχως να συμπίπτει χωρικά με την αρχική τροχιά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10, η γενίκευση παράγει μια κίνηση μορφολογικά όμοια με την αρχική, η οποία δύναται να κλιμακωθεί τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Στη συνέχεια οι 6 μεταβλητές που υπολογίστηκαν κατά τη γενίκευση της κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO και χρησι-



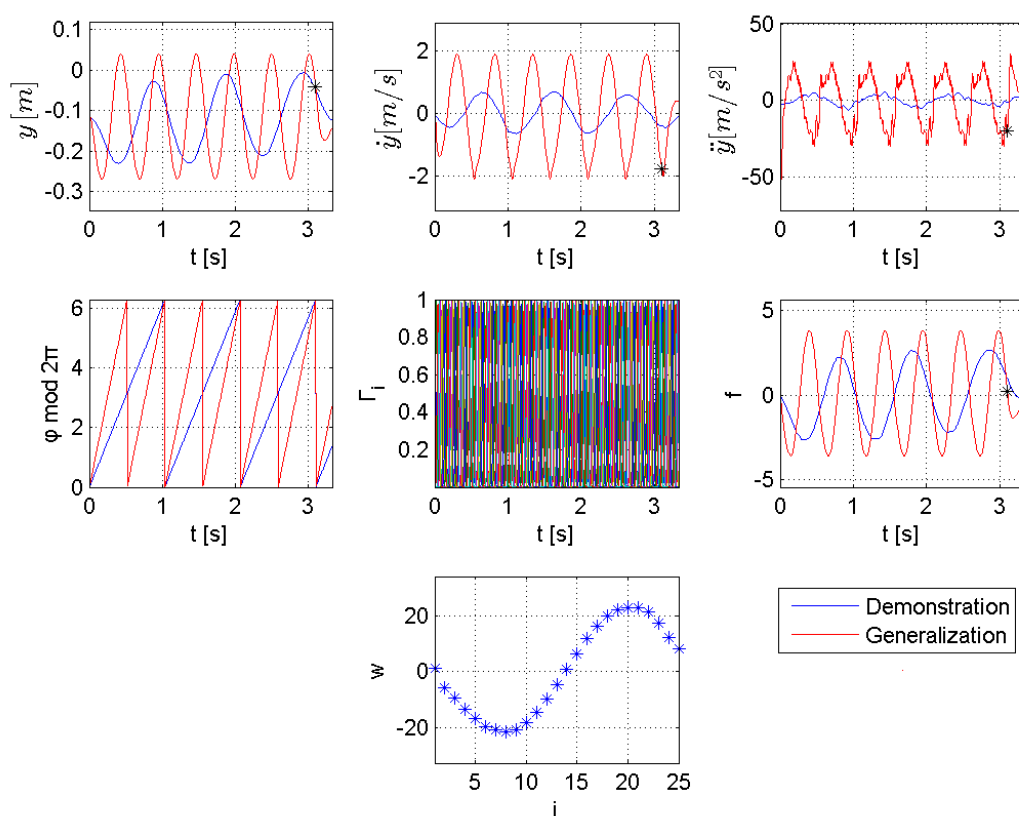
Σχήμα 5.10: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για χειρονομία χαιρετισμού

μπορούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.11 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης γενικευμένης χειρονομίας χαιρετισμού. Η περίοδος της κίνησης συμβολίζεται με τ ($= \frac{2\pi}{\Omega}$).



Σχήμα 5.11: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας χαιρετισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι σχετικές μεταβλητές και συναρτήσεις για τη διδασκαλία και τη γενίκευση της χειρονομίας χαιρετισμού, οι οποίες αντιστοιχούν στη μεταβλητή θέσης για τον άξονα y .



Σχήμα 5.12: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y σε μια περιοδική χειρονομία χαιρετισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης ϕ (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Γ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)

Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται πως η γενικευμένη κίνηση έχει παρόμοια μορφή με την καταγεγραμμένη κίνηση, μολοντί με διαφορετική συχνότητα. Στο ίδιο σχήμα σημειώνεται επίσης με αστερίσκο η χρονική στιγμή κατά την οποία η κίνηση περνάει από την περιοδική φάση της στη φθίνουσα φάση της, ώστε να περατωθεί με ομαλό τρόπο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 οι τιμές της συνάρτησης f στο τέλος της κίνησης, δηλαδή μετά τον αστερίσκο στο Σχήμα 5.12 αποκόπηκαν κατά τη διδασκαλία καθώς δεν συνέπιπταν με τις τιμές της στο υπόλοιπο της κίνησης, λόγω την επιβράδυνσης προς την ακινησία.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μεταβλητές Ω , ϕ και οι συναρτήσεις Γ_i είναι κοινές για τις μεταβλητές θέσης και για τις μεταβλητές προσανατολισμού.

5.4 Αποτελέσματα μεικτών κινήσεων ενός χεριού

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών διδασκαλίας και γενίκευσης για μια μεικτή κίνηση και συγκεκριμένα για μια παντομιμική χειρονομία καθαρισμού μιας επιφάνειας η οποία εκτελέστηκε με το δεξί χέρι, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3 για τις μεικτές κινήσεις.

5.4.1 Χειρονομία καθαρισμού

Η κίνηση που επιλέχθηκε για την καταγραφή αποτελείται από μια περιοδική κίνηση (ακόλουθος) που πραγματοποιείται γύρω από ένα κινούμενο κέντρο το οποίο με τη σειρά του εκτελεί μια διακριτή κίνηση (οδηγός). Και οι δύο κινήσεις πραγματοποιούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου σε ένα επίπεδο, το οποίο συμπίπτει με το επίπεδο $y - z$ του συστήματος αναφοράς του χώρου. Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται τόσο στην καταγεγραμμένη κίνηση όσο και στη γενικευμένη κίνηση, χάριν απλότητας και για να είναι πιο ευκρινής η χειρονομία.

Επειδή πρόκειται για χειρονομία και όχι για την εκτέλεση κάποιας εργασίας, το επίπεδο στο οποίο εκτελείται η κίνηση δεν είναι απαραίτητο να αλλάξει κατά την εξέλιξη της κίνησης, αν και γενικότερα θα μπορούσε να είναι οποιοδήποτε επίπεδο κρίνεται επιθυμητό, όπως π.χ. το επίπεδο $x - y$.

Η χρήση των CCDMPs διευκολύνει τη γενίκευση της χειρονομίας καθαρισμού κατά την αλλαγή του επιπέδου, καθώς μόνο το διακριτό τμήμα της κίνησης χρειάζεται να κωδικοποιηθεί εκ νέου. Το περιοδικό τμήμα της κίνησης έχει κωδικοποιηθεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων που ορίζει το διακριτό τμήμα στο οποίο σύστημα έχει την ίδια εξέλιξη κι έτσι δεν είναι απαραίτητη η εκ νέου κωδικοποίησή του, παρά μόνο ο επανυπολογισμός των μητρών R_G^L .

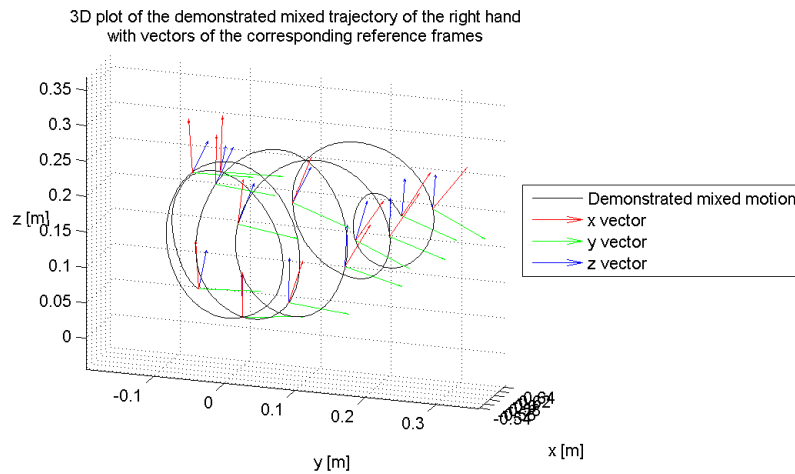
5.4.1.1 Καταγεγραμμένη κίνηση

Αρχικά παρουσιάζονται η καταγεγραμμένη τροχιά του αισθητήρα του δεξιού χεριού για τη μεικτή κίνηση στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του αισθητήρα σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.13.

Παρουσιάζονται επίσης οι τροχιές που προέκυψαν μετά το διαχωρισμό της μεικτής κίνησης σε διακριτό και περιοδικό τμήμα στα Σχήματα 5.14 και 5.15 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται τέλος η τροχιά του περιοδικού τμήματος (ακόλουθου) στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του διακριτού τμήματος (οδηγού).

Στη συνέχεια οι 6 καταγεγραμμένες μεταβλητές της μεικτής κίνησης μετατρέπονται από το

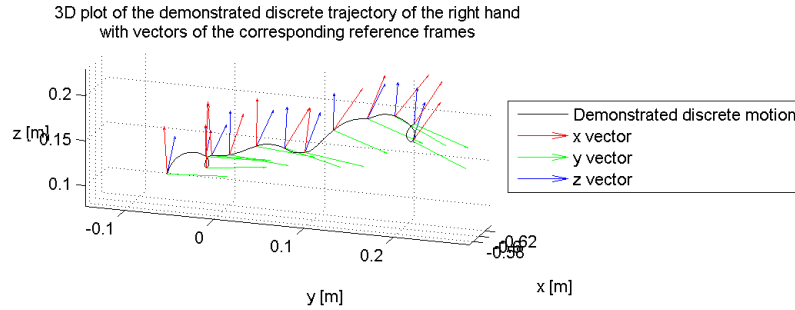


Σχήμα 5.13: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για τη μεικτή χειρονομία καθαρισμού

περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.17 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης χειρονομίας καθαρισμού που καταγράφηκε. Η περίοδος του περιοδικού τμήματος της κίνησης συμβολίζεται με τ ($= \frac{2\pi}{\Omega}$).

5.4.1.2 Γενικευμένη κίνηση

Για τη γενίκευση του διακριτού τμήματος της κίνησης, όλες οι παράμετροι επιλέγονται ίδιες με εκείνες της κίνησης που διδάχθηκε, εκτός από την παράμετρο g που αντιστοιχεί στη μεταβλητή θέσης στον άξονα y . Η παράμετρος αυτή επιλέγεται τέτοια ώστε η ποσότητα $(g - y_0)$ να κλιμακώνεται κατά έναν επιλεγμένο συντελεστή σε σχέση με την αρχική κίνηση. Ισχύει δηλαδή



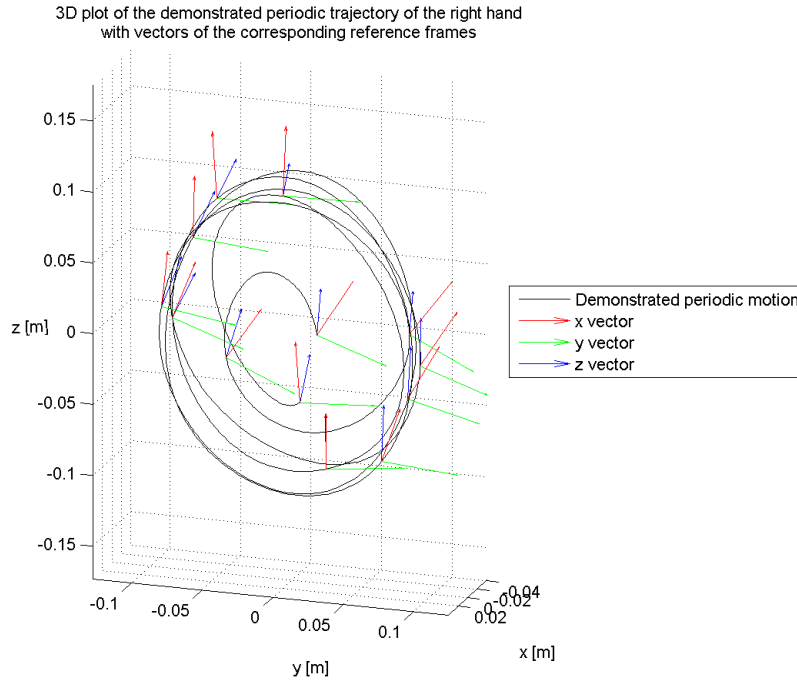
Σχήμα 5.14: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το διακριτό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού

$$\tau^{new} = \tau^{old} \quad , \quad \begin{bmatrix} y_{0,x}^{new} \\ y_{0,y}^{new} \\ y_{0,z}^{new} \\ y_{0,\theta_x}^{new} \\ y_{0,\theta_y}^{new} \\ y_{0,\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{old} \\ y_{0,y}^{old} \\ y_{0,z}^{old} \\ y_{0,\theta_x}^{old} \\ y_{0,\theta_y}^{old} \\ y_{0,\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} g_x^{new} \\ g_y^{new} \\ g_z^{new} \\ g_{\theta_x}^{new} \\ g_{\theta_y}^{new} \\ g_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^{old} \\ 1.5 \cdot (g_y^{old} - y_{0,y}^{old}) + y_{0,y}^{new} \\ g_z^{old} \\ g_{\theta_x}^{old} \\ g_{\theta_y}^{old} \\ g_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια χωρικά κλιμακωμένη κίνηση παρόμοια με την αρχική, η οποία έχει την ίδια διάρκεια.

Με βάση την αρχική επίδειξη της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται η νέα τροχιά του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκαταναμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.18, όπου και συγκρίνονται με την αρχική τροχιά και το αρχικό σύστημα αναφοράς.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18, η γενίκευση παράγει μια κίνηση μορφολογικά όμοια με την αρχική, η οποία δύναται να κλιμακωθεί τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.



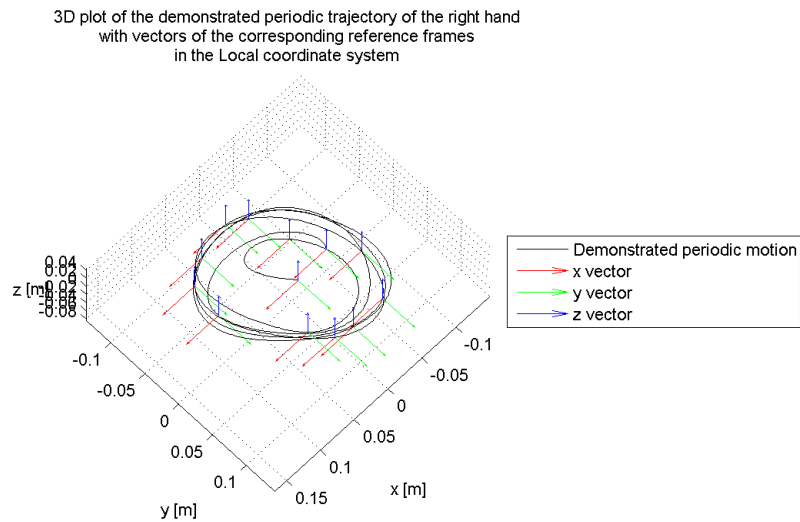
Σχήμα 5.15: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού

Για τη γενίκευση του περιοδικού τμήματος της κίνησης στο τοπικό σύστημα αναφοράς του οδηγού, όλες οι παράμετροι επιλέγονται ίδιες με εκείνες της κίνησης που διδάχθηκε, εκτός από την παράμετρο Ω και τις παραμέτρους r που αντιστοιχούν στις μεταβλητές θέσης για τους τρεις χωρικούς άξονες x , y και z στο τοπικό σύστημα, οι οποίοι ορίζουν το επίπεδο της κίνησης. Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται κλιμακωμένες κατά έναν επιλεγμένο συντελεστή σε σχέση με την αρχική κίνηση. Ισχύει δηλαδή

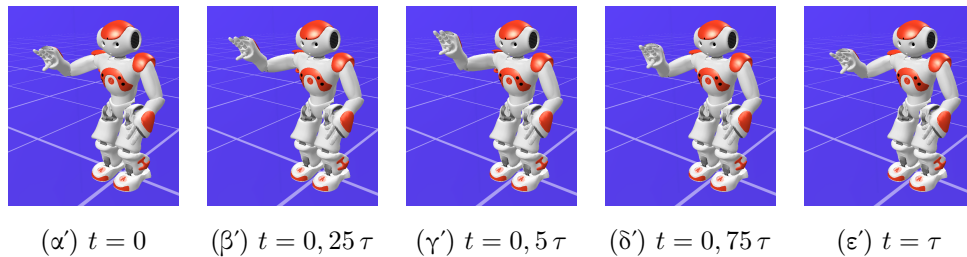
$$\Omega^{new} = 2 \cdot \Omega^{old} \quad , \quad \begin{bmatrix} y_{0,x}^{new} \\ y_{0,y}^{new} \\ y_{0,z}^{new} \\ y_{0,\theta_x}^{new} \\ y_{0,\theta_y}^{new} \\ y_{0,\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{old} \\ y_{0,y}^{old} \\ y_{0,z}^{old} \\ y_{0,\theta_x}^{old} \\ y_{0,\theta_y}^{old} \\ y_{0,\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} g_x^{new} \\ g_y^{new} \\ g_z^{new} \\ g_{\theta_x}^{new} \\ g_{\theta_y}^{new} \\ g_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^{old} \\ g_y^{old} \\ g_z^{old} \\ g_{\theta_x}^{old} \\ g_{\theta_y}^{old} \\ g_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} r_x^{new} \\ r_y^{new} \\ r_z^{new} \\ r_{\theta_x}^{new} \\ r_{\theta_y}^{new} \\ r_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \cdot r_x^{old} \\ 1.5 \cdot r_y^{old} \\ 1.5 \cdot r_z^{old} \\ r_{\theta_x}^{old} \\ r_{\theta_y}^{old} \\ r_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια ταλάντωση, η οποία έχει τη διπλάσια συχνότητα και διαφορετικό πλάτος από την αρχική κίνηση, αλλά το ίδιο κέντρο και το ίδιο σημείο αρχής με αυτή.

Με βάση την αρχική επίδειξη της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο



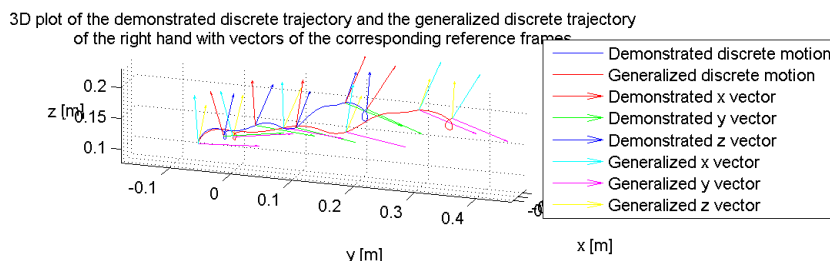
Σχήμα 5.16: Τροχιά αισθητήρα δεξιού χεριού (μαύρο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση του συστήματος αναφοράς του αισθητήρα (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο τοπικό σύστημα αναφοράς του οδηγού



Σχήμα 5.17: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας καθαρισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται η νέα τροχιά του δεξιού χεριού στο σύστημα αναφοράς του οδηγού και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.19, όπου και συγκρίνονται με την αρχική τροχιά και το αρχικό σύστημα αναφοράς.

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η γενικευμένη τροχιά του δεξιού χεριού στο καθολικό σύστημα αναφοράς και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές, όπου και συγκρίνονται με την αρχική τροχιά και το αρχικό σύστημα αναφοράς.



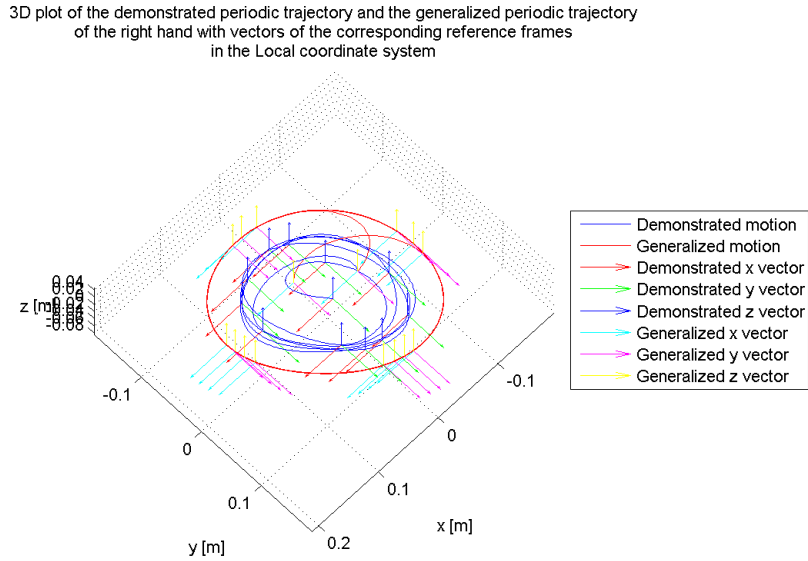
Σχήμα 5.18: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το διακριτό τμήμα της μεικτής χειρονομίας καθαρισμού

Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται τέλος η γενικευμένη τροχιά για τη μεικτή χειρονομία καθαρισμού, η οποία προέκυψε από το συνδυασμό του γενικευμένου διακριτού και του γενικευμένου περιοδικού τμήματος, όπου και συγκρίνεται με την αρχική τροχιά της χειρονομίας καθαρισμού.

Στο Σχήμα 5.21 η γενικευμένη τροχιά έχει μετατοπιστεί κατά 0.5 m στον άξονα z ώστε να είναι ορατή δίχως να συμπίπτει χωρικά με την αρχική τροχιά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, η γενίκευση παράγει μια κίνηση μορφολογικά όμοια με την αρχική, η οποία δύναται να κλιμακωθεί τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Στη συνέχεια οι 6 μεταβλητές που υπολογίστηκαν κατά τη γενίκευση της μεικτής κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.22 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης γενικευμένης χειρονομίας καθαρισμού. Η περίοδος της κίνησης συμβολίζεται με $\tau (= \frac{2\pi}{\Omega})$.

Στα Σχήματα 5.23 και 5.24 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι σχετικές μεταβλητές και συναρτήσεις για τη διδασκαλία και τη γενίκευση της χειρονομίας καθαρισμού, οι οποίες αντιστοιχούν στη μεταβλητή θέσης για τον άξονα y , για το διακριτό και το περιοδικό τμήμα της κίνησης αντίστοιχα.



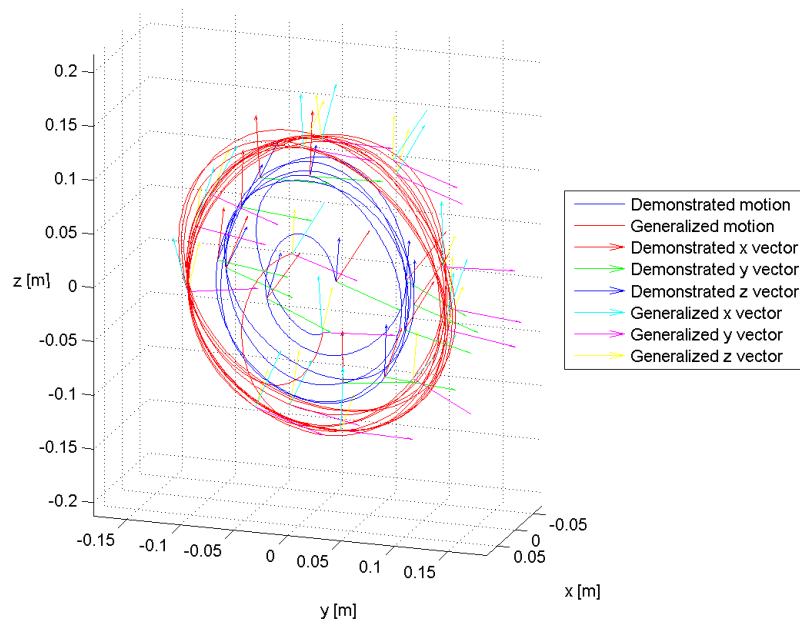
Σχήμα 5.19: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο τοπικό σύστημα αναφοράς του οδηγού

Στο Σχήμα 5.25 απεικονίζονται η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση στον άξονα y για την καταγραφή και τη γενίκευση της μεικτής χειρονομίας καθαρισμού.

Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται πως η γενικευμένη κίνηση έχει παρόμοια μορφή με την καταγεγραμμένη κίνηση, μολονότι με διαφορετική συχνότητα, διαφορετικό πλάτος ταλάντωσης και διαφορετικό σημείο έλξης. Στο ίδιο σχήμα σημειώνεται επίσης με αστερίσκο η χρονική στιγμή κατά την οποία το περιοδικό τμήμα της κίνησης περνάει από την περιοδική φάση του στη φθίνουσα φάση του, ώστε να περατωθεί με ομαλό τρόπο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.

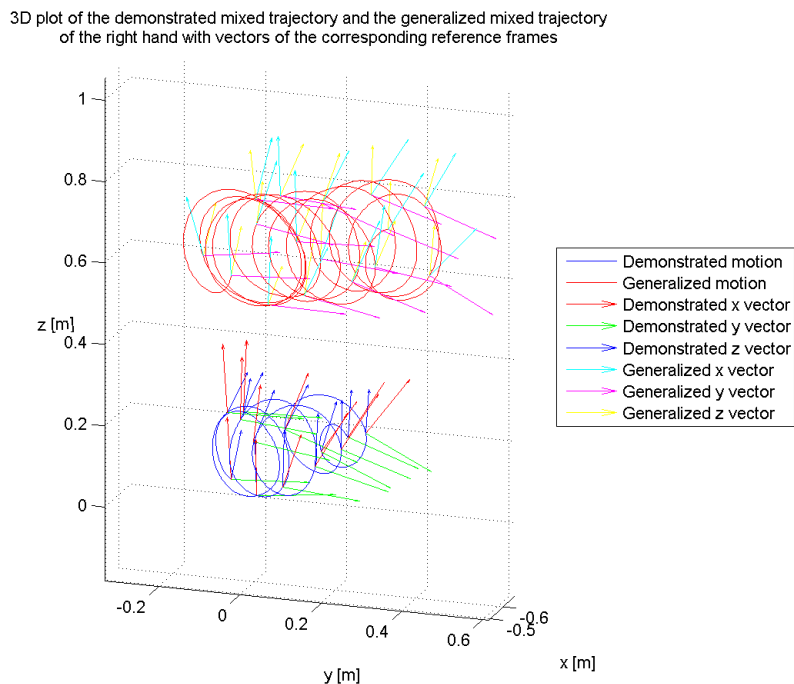
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χειρονομίας δεν ήταν πλήρως εμφανές το πλεονέκτημα της κωδικοποίησης της μεικτής χειρονομίας από τα CCDMPs, καθώς ο προσανατολισμός του οδηγού δεν παρουσίασε σημαντικές αλλαγές και η χειρονομία εξελίχθηκε σχεδόν σε ένα επίπεδο. Το πλεονέκτημα αυτό συνίσταται στην προσαρμογή της καθολικής κίνησης του ακόλουθου σε διαφορετικά και εν δυνάμει μεταβαλλόμενα επίπεδα, χωρίς να χρειαστεί η εκ νέου διδασκαλία της κίνησής του στο τοπικό σύστημα του οδηγού. Αντιθέτως, η κίνηση του οδηγού, και συγκεκριμένα ο προσανατολισμός του, γενικεύεται κατάλληλα και μέσω των CCDMPs και της ίδιας τοπικής κίνησης του ακόλουθου παράγεται η επιθυμητή χειρονομία. Στο [27] εξετάζεται η γενίκευση μιας παρόμοιας χειρονομίας σε διαφορετικό, αλλά στατικό επίπεδο, ενώ στο [5]

3D plot of the demonstrated periodic trajectory and the generalized periodic trajectory of the right hand with vectors of the corresponding reference frames in the Global coordinate system

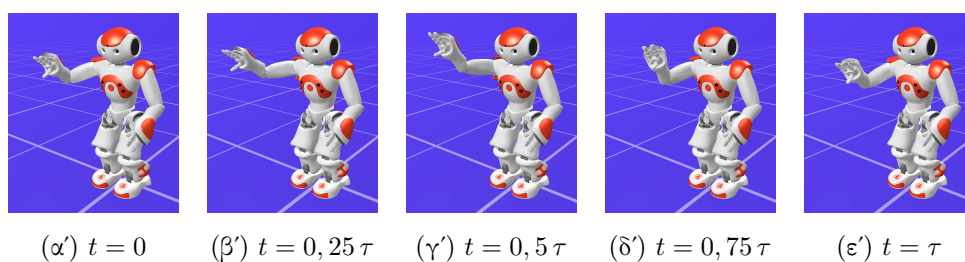


Σχήμα 5.20: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για το περιοδικό τμήμα της χειρονομίας καθαρισμού στο καθολικό σύστημα αναφοράς

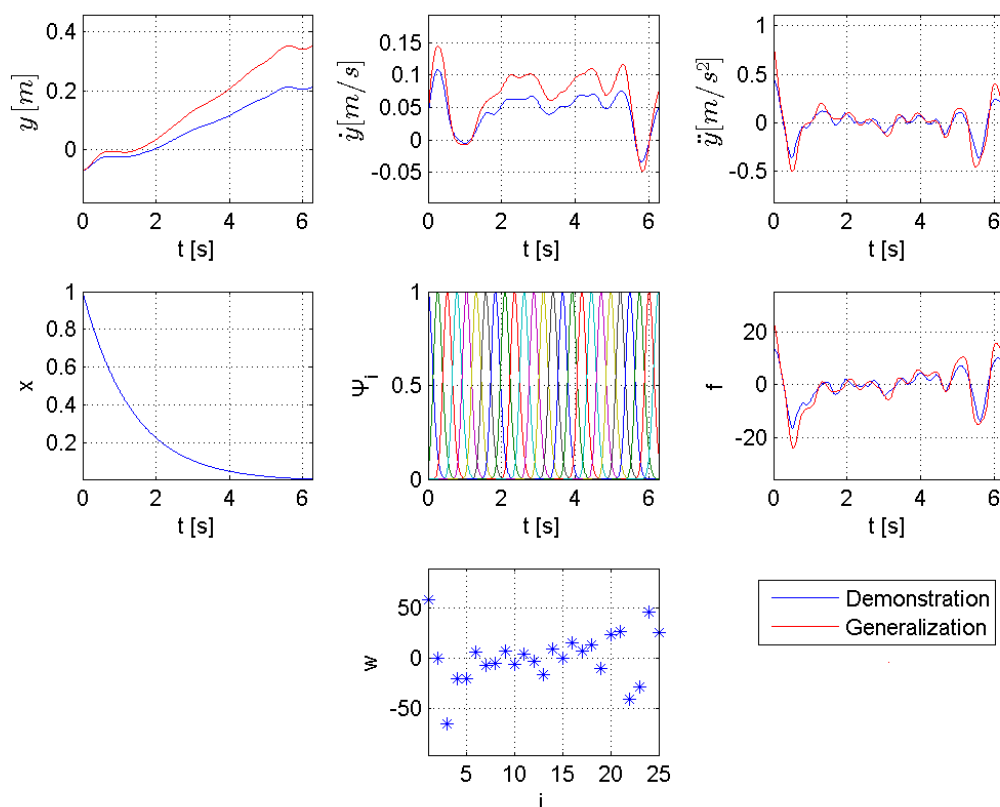
εξετάζεται η γενίκευση μιας παρόμοιας χειρονομίας σε μεταβαλλόμενο επίπεδο.



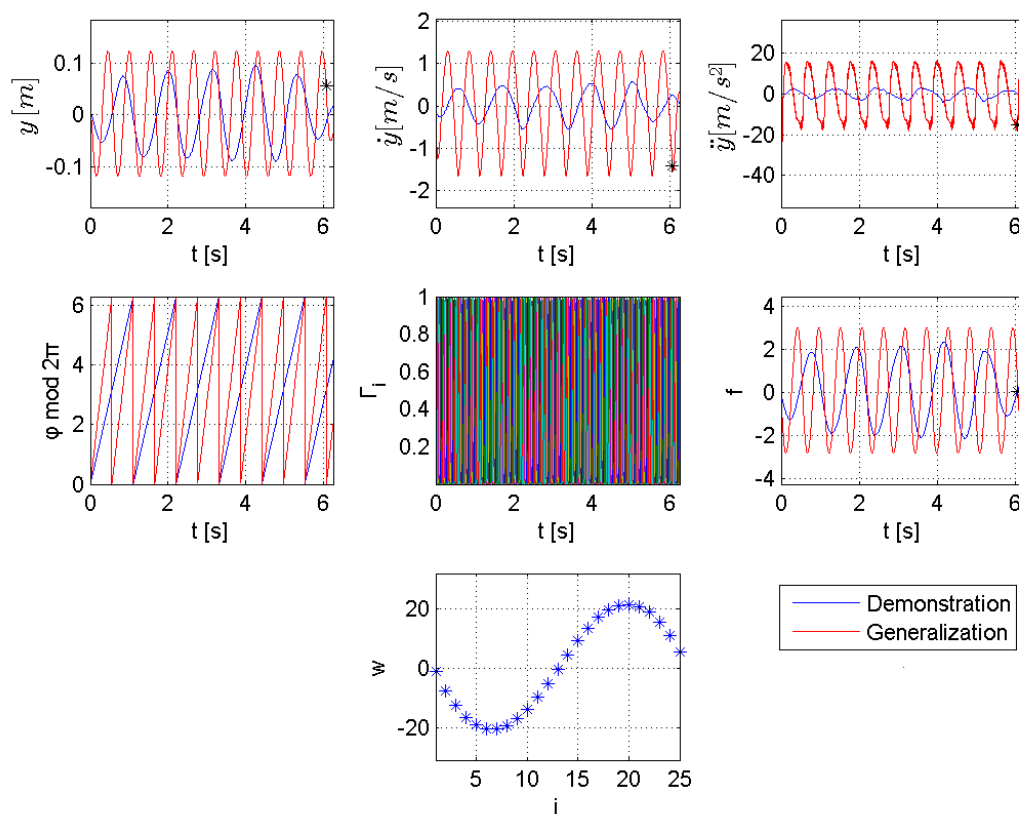
Σχήμα 5.21: Σύγκριση αρχικής τροχιάς (μπλε) δεξιού χεριού στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (κόκκινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για τη μεικτή χειρονομία καθαρισμού



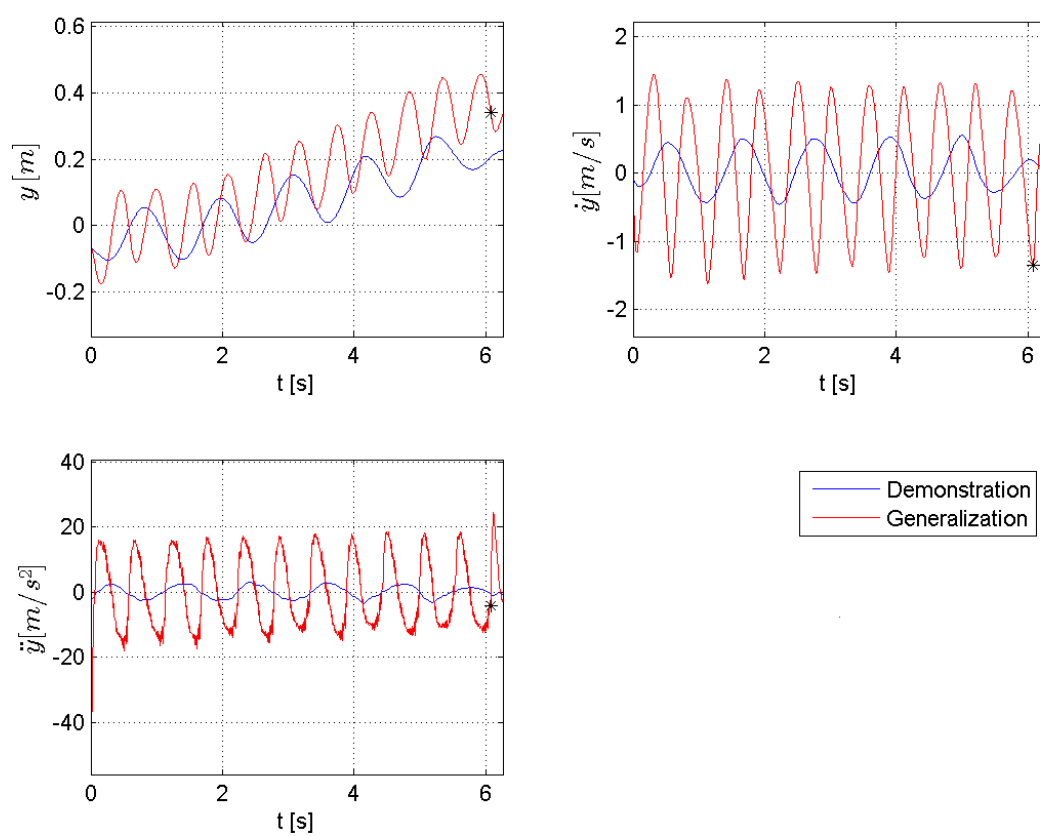
Σχήμα 5.22: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας καθαρισμού από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)



Σχήμα 5.23: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του διακριτού τμήματος μιας μεικτής χειρονομίας καθαρισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)



Σχήμα 5.24: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του περιοδικού τμήματος μιας μεικτής χειρονομίας καθαρισμού. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης ϕ (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Γ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)



Σχήμα 5.25: Θέση (πάνω αριστερά), ταχύτητα (πάνω δεξιά) και επιτάχυνση (κάτω αριστερά) στον άξονα y για μια μεικτή χειρονομία καθαρισμού

5.5 Αποτελέσματα παραμετροποιημένων κινήσεων ενός χεριού

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών διδασκαλίας και γενίκευσης για μια παραμετροποιημένη διακριτή κίνηση και συγκεκριμένα για μια παραμετροποιημένη δεικτική χειρονομία η οποία εκτελέστηκε με το δεξί χέρι, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3 για τις παραμετροποιημένες κινήσεις.

Η παραμετροποίηση της δεικτικής χειρονομίας υλοποιείται με την εισαγωγή ενός συναισθήματος έντασης (expressivity) στην κίνηση. Η ένταση αυτή εκφράζεται κυρίως μέσω της αλλαγής της τροχιάς στον άξονα z . Στους άξονες x και y δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή της τροχιάς. Παρ' όλα αυτά η παραμετροποίηση εφαρμόζεται για όλους τους βαθμούς ελευθερίας.

5.5.1 Δεικτική κίνηση με συναίσθημα

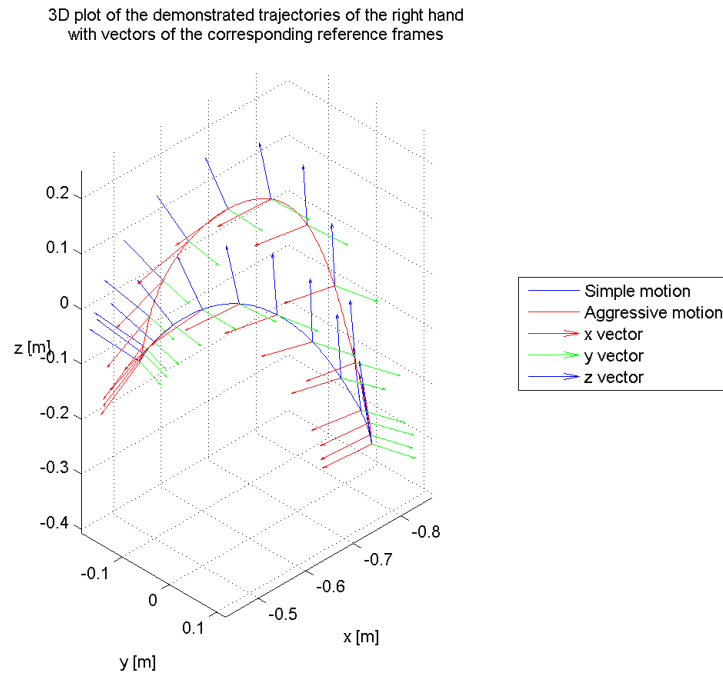
Πραγματοποιήθηκαν δύο επιδείξεις της κίνησης, οι οποίες είχαν τα ίδια περίπου σημεία αρχής και τα ίδια σημεία πέρατος και την ίδια περίπου διάρκεια. Η μια επίδειξη αντιστοιχούσε στην απλή δεικτική κίνηση ($\lambda = 0$), όπου δεν εκφραζόταν το συναίσθημα έντασης, ενώ η άλλη επίδειξη αντιστοιχούσε στην έντονη δεικτική κίνηση ($\lambda = 1$), όπου το συναίσθημα έντασης εκφραζόταν στο μέγιστο βαθμό.

Χάριν απλότητας, τόσο κατά την επίδειξη όσο και αργότερα κατά τη γενίκευση, τα σημεία αρχής και πέρατος της κίνησης, καθώς και η διάρκεια της κίνησης διατηρήθηκαν σταθερά για όλες τις κινήσεις, ώστε να δοθεί έμφαση στη διαδικασία της παραμετροποίησης και στην επίδραση που έχει η παράμετρος λ στη διαμόρφωση της τροχιάς της κίνησης.

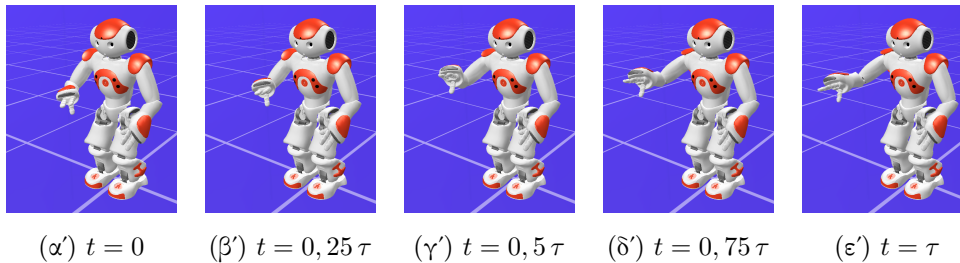
5.5.1.1 Καταγεγραμμένες κινήσεις

Αρχικά παρουσιάζονται οι καταγεγραμμένες τροχιές του αισθητήρα του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και τα συστήματα αναφοράς του αισθητήρα σε ισοκατανομημένες στο χρόνο στιγμές για τις δύο καταγεγραμμένες κινήσεις στο Σχήμα 5.26.

Στη συνέχεια οι 6 καταγεγραμμένες μεταβλητές κάθε κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στα Σχήματα 5.27 και 5.28 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης απλής κίνησης και της έντονης κίνησης αντίστοιχα.



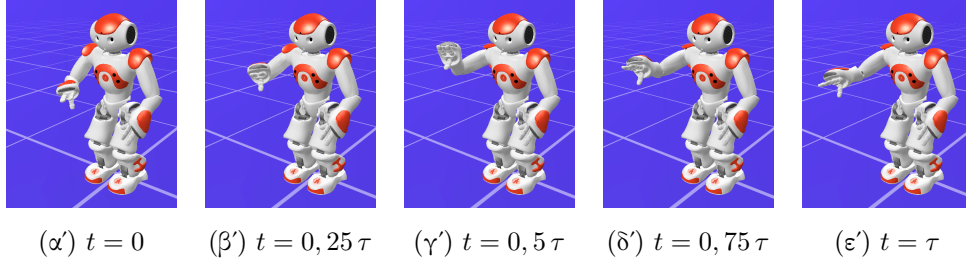
Σχήμα 5.26: Τροχιές αισθητήρα δεξιού χεριού για την απλή κίνηση (μπλε) και για την ένονη κίνηση (κόκκινο) στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση με συναίσθημα



Σχήμα 5.27: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης απλής δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphie για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

5.5.1.2 Γενικευμένη κίνηση

Για τη γενίκευση της κίνησης, οι παράμετροι y_0 , g και τ επιλέγονται ίδιες με εκείνες των κινήσεων που διδάχθηκαν, ενώ για την παράμετρο λ επιλέγεται μια τιμή που ανήκει στο συνεχές διάστημα $[0, 1]$. Ισχύει δηλαδή



Σχήμα 5.28: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης έντονης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

$$\tau^{new} = \tau^{old} \quad , \quad \begin{bmatrix} y_{0,x}^{new} \\ y_{0,y}^{new} \\ y_{0,z}^{new} \\ y_{0,\theta_x}^{new} \\ y_{0,\theta_y}^{new} \\ y_{0,\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{old} \\ y_{0,y}^{old} \\ y_{0,z}^{old} \\ y_{0,\theta_x}^{old} \\ y_{0,\theta_y}^{old} \\ y_{0,\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad , \quad \begin{bmatrix} g_x^{new} \\ g_y^{new} \\ g_z^{new} \\ g_{\theta_x}^{new} \\ g_{\theta_y}^{new} \\ g_{\theta_z}^{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x^{old} \\ g_y^{old} \\ g_z^{old} \\ g_{\theta_x}^{old} \\ g_{\theta_y}^{old} \\ g_{\theta_z}^{old} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \lambda^{new} = 0.5$$

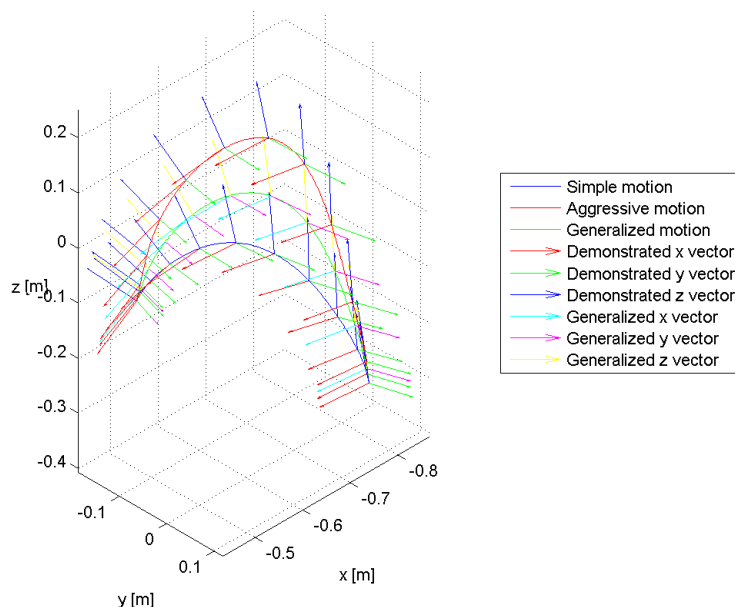
Με βάση τις καταγεγραμμένες επιδείξεις της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται η νέα τροχιά του δεξιού χεριού στον τρισδιάστατο χώρο και το σύστημα αναφοράς του σε ισοκαταναμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.29, όπου και συγκρίνονται με τις καταγεγραμμένες τροχιές και τα αρχικά συστήματα αναφοράς.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.29, η γενίκευση παράγει μια κίνηση η οποία βρίσκεται μορφολογικά μεταξύ της απλής και της έντονης κίνησης.

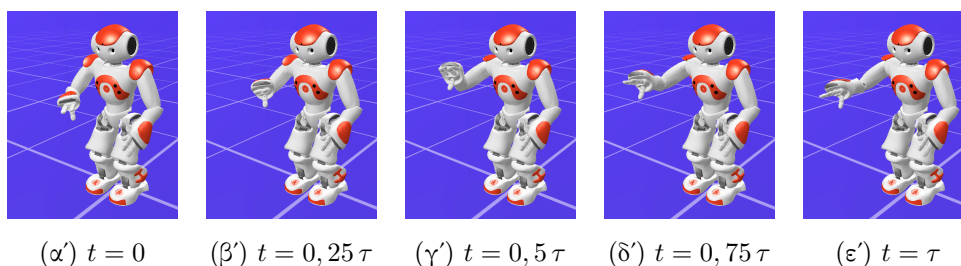
Στη συνέχεια οι 6 μεταβλητές που υπολογίστηκαν κατά τη γενίκευση της κίνησης μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.30 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης γενικευμένης κίνησης.

Στο Σχήμα 5.31 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι σχετικές μεταβλητές και συναρτήσεις για τη διδασκαλία και τη γενίκευση της επιλεγμένης κίνησης, οι οποίες αντιστοιχούν στη μεταβλητή θέσης για τον άξονα z . Απεικονίζεται επίσης ο Coupling Term που εκφράζει το συναίσθημα της έντασης στον άξονα z .

3D plot of the demonstrated trajectories and the generalized trajectory of the right hand with vectors of the corresponding reference frames

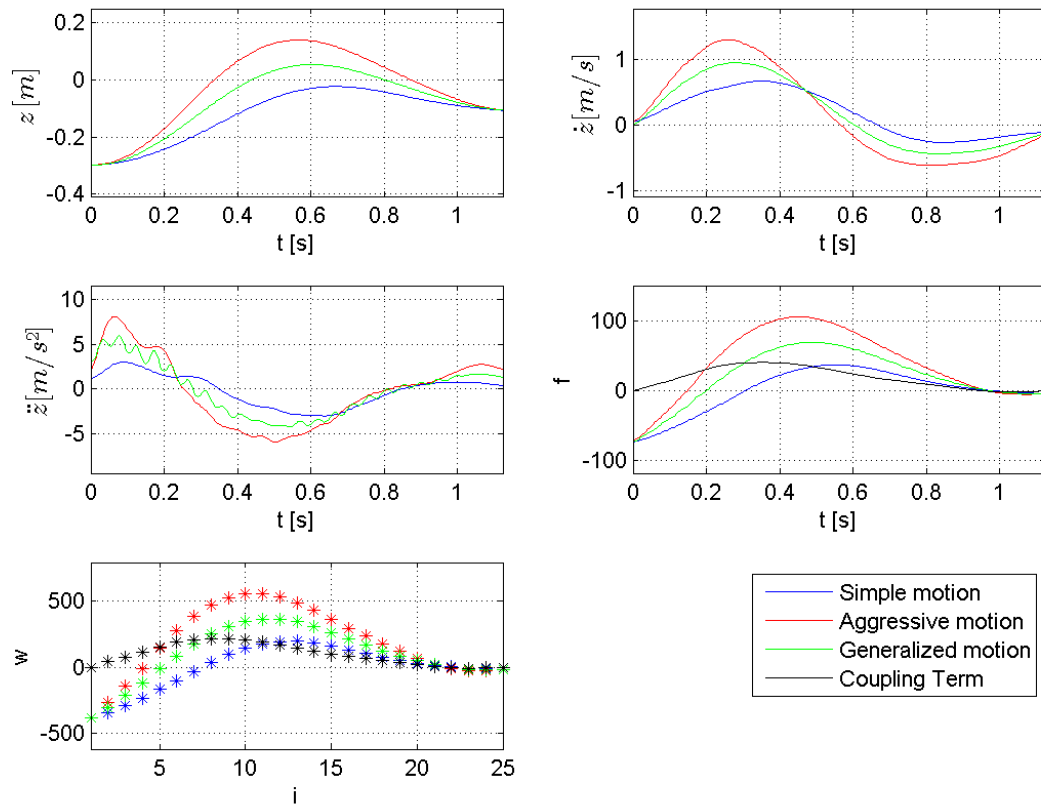


Σχήμα 5.29: Σύγκριση των τροχιών του δεξιού χεριού για την απλή κίνηση (μπλε) και την έντονη κίνηση (κόκκινο) στον 3Δ χώρο με την υπολογισμένη κατά τη γενίκευση τροχιά (πράσινο) με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς του χεριού για παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση με συναίσθημα



Σχήμα 5.30: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης παραμετροποιημένης δεικτικής κίνησης από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25 \tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5 \tau$ (κέντρο), $t = 0,75 \tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

Στο Σχήμα 5.31 φαίνεται πως όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη γενικευμένη κίνηση βρίσκονται μορφολογικά μεταξύ εκείνων της απλής κίνησης και εκείνων της έντονης κίνησης, όπως ήταν αναμενόμενο. Παρατηρείται επίσης πως μορφολογικά η κίνηση βρίσκεται στο ακριβές μέσο των δύο κινήσεων, γεγονός που οφείλεται στην τιμή της παραμέτρου λ η οποία βρίσκεται στο μέσο του διαστήματος $[0, 1]$. Το γεγονός πως ο Coupling Term στον άξονα z λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή κατά το πρώτο μισό της κίνησης δείχνει ότι η έκφραση του συναισθήματος της έντασης είναι ισχυρότερη σε αυτό το διάστημα.



Σχήμα 5.31: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα z σε μια παραμετροποιημένη δεικτική κίνηση. Απεικονίζονται οι θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω δεξιά), η επιτάχυνση (κέντρο αριστερά), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)

Εν τέλει αποδεικνύεται πως η προτεινόμενη μοντελοποίηση του Όρου Σύζευξης C_t με τη χρήση της παραμέτρου λ αποφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

5.6 Αποτελέσματα κινήσεων εκτελούμενων από δύο χέρια

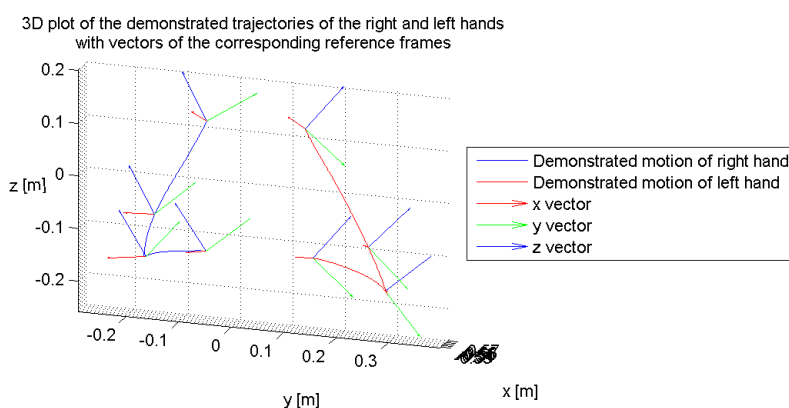
Στο τμήμα αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαδικασιών διδασκαλίας και γενίκευσης για μια διακριτή κίνηση και συγκεκριμένα για μια δυναμική χειρονομία απεικόνισης ενός τριγώνου, η οποία εκτελέστηκε με τα δύο χέρια, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3 για τις διακριτές κινήσεις που εκτελούνται από δύο χέρια.

5.6.1 Χειρονομία σχήματος τριγώνου

Η κίνηση που επιλέχθηκε για την καταγραφή αποτελείται από μια διακριτή κίνηση από κάθε χέρι, η οποία εκτελείται συγχρονισμένα με την άλλη. Η κίνηση των δύο χεριών στον τρισδιάστατο χώρο σχηματίζει συνολικά ένα τριγωνικό σχήμα στο επίπεδο $y-z$ του συστήματος αναφοράς του χώρου, ενώ η κίνηση του ενός χεριού είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο $x-z$ με την κίνηση του άλλου. Το επίπεδο $y-z$ χρησιμοποιείται τόσο στην καταγεγραμμένη κίνηση όσο και στη γενικευμένη κίνηση, χάριν απλότητας και για να είναι πιο ευκρινής η χειρονομία.

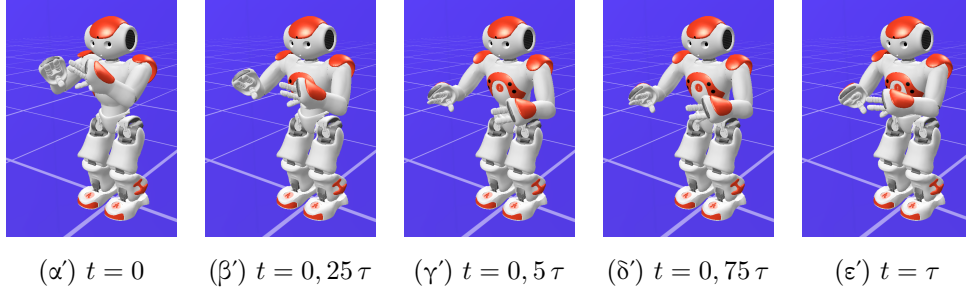
5.6.1.1 Καταγεγραμμένη κίνηση

Αρχικά παρουσιάζονται η καταγεγραμμένες τροχιές των αισθητήρων των δύο χεριών για την κίνηση στον τρισδιάστατο χώρο και τα συστήματα αναφοράς των αισθητήρων σε ισοκατανεμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.32.



Σχήμα 5.32: Τροχιές αισθητήρων δεξιού (μπλε) και αριστερού (κόκκινο) χεριού στον 3Δ χώρο με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς τους (άξονας x - κόκκινο, άξονας y - πράσινο, άξονας z - μπλε) για χειρονομία σχήματος τριγώνου

Στη συνέχεια οι 6 καταγεγραμμένες μεταβλητές της κίνησης κάθε χεριού μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.33 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου που καταγράφηκε.



Σχήμα 5.33: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της αναπαρηγμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

5.6.1.2 Γενικευμένη κίνηση

Για τη γενίκευση της κίνησης, όλες οι παράμετροι επιλέγονται ίδιες με εκείνες της κίνησης που διδάχθηκε, εκτός από τις παραμέτρους g που αντιστοιχούν στις μεταβλητές θέσης στους άξονες x , y και z για τα δύο χέρια. Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται τέτοιες ώστε οι ποσότητες $(g - y_0)$ για τα δύο χέρια να κλιμακώνονται κατά έναν επιλεγμένο συντελεστή σε σχέση με την αρχική κίνηση. Για τη διατήρηση της συμμετρικής φύσεως της κίνησης ο συντελεστής επιλέγεται ο ίδιος για τους δύο άξονες και για τα δύο χέρια. Ισχύει δηλαδή

$$\begin{bmatrix} y_{0,x}^{R,new} \\ y_{0,y}^{R,new} \\ y_{0,z}^{R,new} \\ y_{0,\theta_x}^{R,new} \\ y_{0,\theta_y}^{R,new} \\ y_{0,\theta_z}^{R,new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{R,old} \\ y_{0,y}^{R,old} \\ y_{0,z}^{R,old} \\ y_{0,\theta_x}^{R,old} \\ y_{0,\theta_y}^{R,old} \\ y_{0,\theta_z}^{R,old} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} g_x^{R,new} \\ g_y^{R,new} \\ g_z^{R,new} \\ g_{\theta_x}^{R,new} \\ g_{\theta_y}^{R,new} \\ g_{\theta_z}^{R,new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \cdot \left(g_x^{R,old} - y_{0,x}^{R,old} \right) + y_{0,x}^{R,new} \\ 1.5 \cdot \left(g_y^{R,old} - y_{0,y}^{R,old} \right) + y_{0,y}^{R,new} \\ 1.5 \cdot \left(g_z^{R,old} - y_{0,z}^{R,old} \right) + y_{0,z}^{R,new} \\ g_{\theta_x}^{R,old} \\ g_{\theta_y}^{R,old} \\ g_{\theta_z}^{R,old} \end{bmatrix}, \quad \tau^{new} = \tau^{old}$$

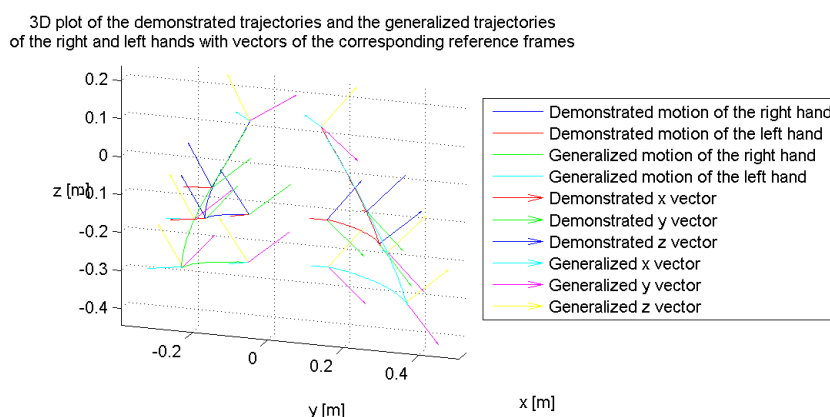
και

$$\begin{bmatrix} y_{0,x}^{L,new} \\ y_{0,y}^{L,new} \\ y_{0,z}^{L,new} \\ y_{0,\theta_x}^{L,new} \\ y_{0,\theta_y}^{L,new} \\ y_{0,\theta_z}^{L,new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,x}^{L,old} \\ y_{0,y}^{L,old} \\ y_{0,z}^{L,old} \\ y_{0,\theta_x}^{L,old} \\ y_{0,\theta_y}^{L,old} \\ y_{0,\theta_z}^{L,old} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} g_x^{L,new} \\ g_y^{L,new} \\ g_z^{L,new} \\ g_{\theta_x}^{L,new} \\ g_{\theta_y}^{L,new} \\ g_{\theta_z}^{L,new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 \cdot \left(g_x^{L,old} - y_{0,x}^{L,old} \right) + y_{0,x}^{L,new} \\ 1.5 \cdot \left(g_y^{L,old} - y_{0,y}^{L,old} \right) + y_{0,y}^{L,new} \\ 1.5 \cdot \left(g_z^{L,old} - y_{0,z}^{L,old} \right) + y_{0,z}^{L,new} \\ g_{\theta_x}^{L,old} \\ g_{\theta_y}^{L,old} \\ g_{\theta_z}^{L,old} \end{bmatrix}$$

, όπου οι δείκτες R και L αφορούν τα μεγέθη του δεξιού και του αριστερού χεριού αντίστοιχα.

Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια χωρικά κλιμακωμένη κίνηση παρόμοια με την αρχική, η οποία έχει την ίδια διάρκεια.

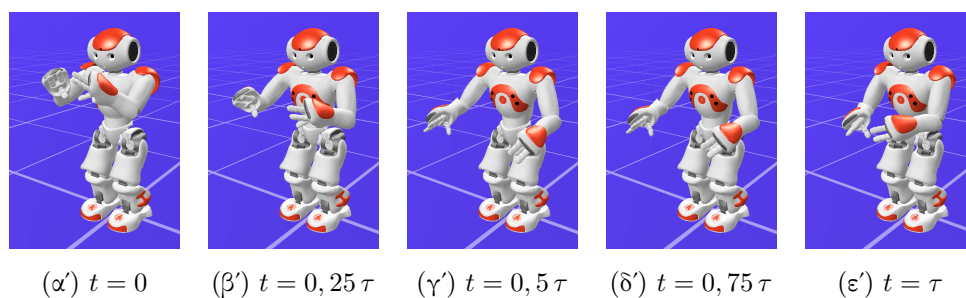
Με βάση την αρχική επίδειξη της κίνησης και τις παραμέτρους της γενικευμένης κίνησης εφαρμόζονται οι διαδικασίες διδασκαλίας και γενίκευσης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη γενικευμένη κίνηση παρουσιάζονται οι νέες τροχιές των δύο χεριών στον τρισδιάστατο χώρο και τα συστήματα αναφοράς τους σε ισοκαταναμημένες στο χρόνο στιγμές στο Σχήμα 5.34, όπου και συγκρίνονται με τις αρχικές τροχιές και τα αρχικά συστήματα αναφοράς.



Σχήμα 5.34: Σύγκριση αρχικών τροχιών δεξιού (μπλε) και αριστερού (κόκκινο) χεριού στον 3Δ χώρο με τις υπολογισμένες κατά τη γενίκευση τροχιές δεξιού (πράσινο) και αριστερού (γαλάζιο) χεριού με παράλληλη παρουσίαση των συστημάτων αναφοράς των χεριών για χειρονομία σχήματος τριγώνου

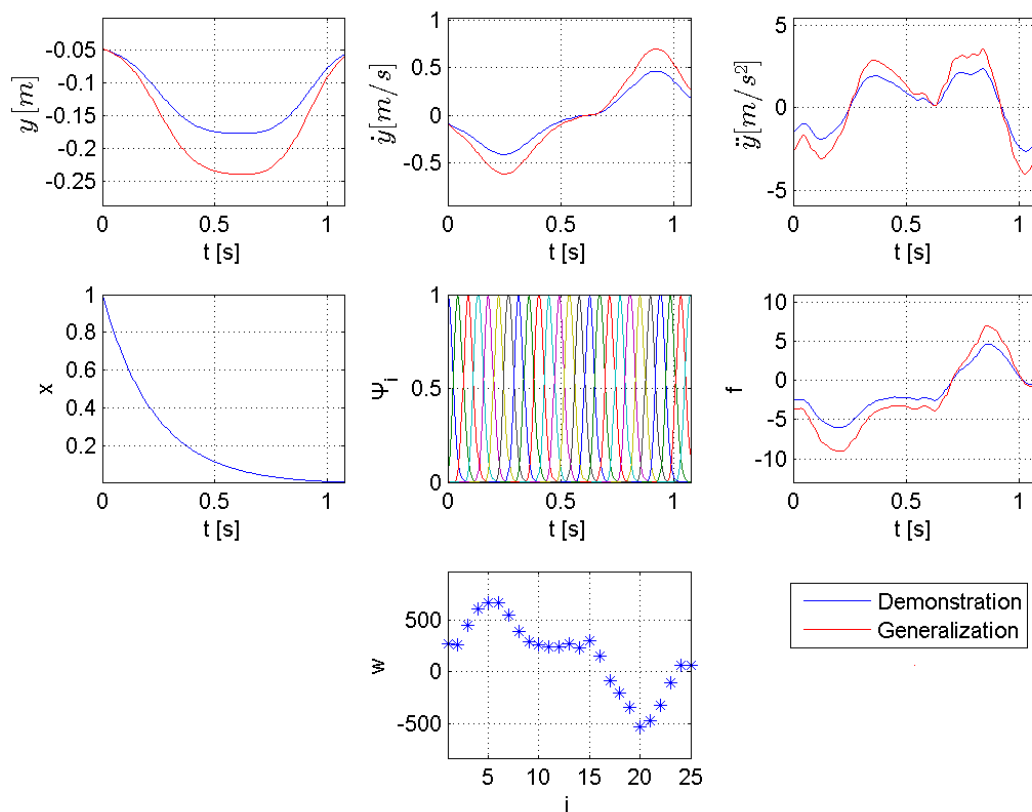
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.34, η γενίκευση παράγει μια κίνηση μορφολογικά όμοια με την αρχική, η οποία δύναται να κλιμακωθεί τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Στη συνέχεια οι 6 μεταβλητές που υπολογίστηκαν κατά τη γενίκευση της κίνησης κάθε χεριού μετατρέπονται από το περιβάλλον ενός ανθρώπου στο περιβάλλον του ρομπότ NAO, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.3 και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση της κίνησης από το ρομπότ NAO μέσω του προγράμματος Choregraphe. Στο Σχήμα 5.35 φαίνονται 5 στιγμιότυπα της προσομοιωμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου που καταγράφηκε.



Σχήμα 5.35: Στιγμιότυπα αναπαράστασης της γενικευμένης χειρονομίας σχήματος τριγώνου από robot NAO στο εικονικό περιβάλλον Choregraphe για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ (αριστερά), $t = 0,25\tau$ (δεύτερο από αριστερά), $t = 0,5\tau$ (κέντρο), $t = 0,75\tau$ (δεύτερο από δεξιά) και $t = \tau$ (δεξιά)

Στο Σχήμα 5.36 απεικονίζονται συγκεντρωτικά όλες οι σχετικές μεταβλητές και συναρτήσεις για τη διδασκαλία και τη γενίκευση της χειρονομίας σχήματος τριγώνου, οι οποίες αντιστοιχούν στη μεταβλητή θέσης για τον άξονα y του δεξιού χεριού.



Σχήμα 5.36: Συγκεντρωτική απεικόνιση όλων των σχετικών μεταβλητών και συναρτήσεων για τον άξονα y του δεξιού χεριού για χειρονομία σχήματος τριγώνου. Απεικονίζονται η θέση (πάνω αριστερά), η ταχύτητα (πάνω κέντρο), η επιτάχυνση (πάνω δεξιά), η μεταβλητή φάσης x (κέντρο αριστερά), οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης Ψ_i (κέντρο), η συνάρτηση f (κέντρο δεξιά) και τα βάρη w_i (κάτω)

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση της παρούσας εργασίας και για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της εργασίας.

6.1 Συμπεράσματα

6.1.1 Περίληψη της εργασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος διδασκαλίας χειρονομιών από άνθρωπο σε ρομπότ. Το πρώτο στάδιο της μεθόδου είναι η επιλογή των χειρονομιών που επιδεικνύονται και η καταγραφή των κινήσεων των χεριών του ανθρώπου-εκπαιδευτή. Το δεύτερο στάδιο είναι η επεξεργασία των μετρήσεων και η εκμάθηση κάθε επιδεδειγμένης χειρονομίας ανάλογα με το είδος της. Το τρίτο στάδιο είναι η αναπαραγωγή και η γενίκευση των χειρονομιών αυτών ανάλογα με τις παραμέτρους που παρέχονται. Το τέταρτο στάδιο είναι η μετατροπή των γενικευμένων κινήσεων στο περιβάλλον του ρομπότ και η αναπαραγωγή τους από αυτό.

6.1.2 Υποθέσεις, παραδοχές και επιλογές που έγιναν στην πορεία της εργασίας

Στην αρχή της εργασίας έγιναν κάποιες υποθέσεις, παραδοχές και επιλογές για την θεωρητική και την πρακτική υλοποίηση της μεθόδου που εξετάστηκε. Συγκεκριμένα αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Η τοποθέτηση των μαγνητικών αισθητήρων που επιλέχθηκαν για τις καταγραφές των κινήσεων έγινε στις παλάμες των χεριών του εκπαιδευτή, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η χρησιμότητα του περιορισμένου αριθμού αισθητήρων που υπήρχε. Λόγω της διάταξης

αυτής, ο κορμός και οι ώμοι του εκπαιδευτή μετακινήθηκαν όσο το δυνατόν λιγότερο κατά τη διάρκεια των καταγραφών ώστε να περιοριστεί το σφάλμα μέτρησης που εισάγεται με αυτόν τον τρόπο, ενώ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προσδιορισμού των θέσεων των ώμων του. Για τις ανάγκες της εργασίας έγινε η παραδοχή πως ο κορμός και οι ώμοι του εκπαιδευτή παρέμειναν ακίνητοι.

- Για την αναπαράσταση των χειρονομιών επιλέχθηκε το ανθρωπόμορφο ρομπότ NAO, με την παραδοχή ότι οι βαθμοί ελευθερίας που διαθέτει είναι αρκετοί για τη σωστή αναπαραγωγή των καταγεγραμμένων χειρονομιών.
- Η μεταφορά των κινήσεων στο περιβάλλον του ρομπότ NAO έγινε με την παραδοχή πως το ρομπότ δύναται να εκτελέσει τις επιθυμητές κινήσεις με την ίδια διαμόρφωση των τμημάτων του χεριού όπως ο εκπαιδευτής, αρκεί να παρέχεται η καταγεγραμμένη θέση και ο καταγεγραμμένος προσανατολισμός της παλάμης.

6.1.3 Περιορισμοί του αλγορίθμου και της υλοποίησης

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη διδασκαλία και την εκμάθηση ανθρωπίνων χειρονομιών, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχουν κάποιους περιορισμούς. Συγκεκριμένα αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Η επιλογή του ρομπότ NAO περιόρισε τη μορφή των χειρονομιών που καταγράφηκαν. Λόγω του περιορισμένου αριθμού βαθμών ελευθερίας στον καρπό και στα δάκτυλα του ρομπότ οι κινήσεις που επιδείχθηκαν δεν περιείχαν στροφές της παλάμης γύρω από τον καρπό και κινήσεις των δακτύλων. Εξάιρεση αποτελεί η στροφή του καρπού γύρω από τον άξονα που ενώνει τον αγκώνα με τον καρπό.
- Λόγω της έλλειψης περισσότερων αισθητήρων δεν ήταν δυνατή η συνεχής καταγραφή των θέσεων του κορμού, των ώμων, των αγκώνων και των καρπών του εκπαιδευτή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την προσεγγιστική μετατροπή των χειρονομιών από το ανθρώπινο περιβάλλον στο περιβάλλον του ρομπότ NAO.
- Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των κινήσεων από το ρομπότ NAO χρησιμοποιεί μονάχα τη θέση και τον προσανατολισμό της παλάμης του χεριού του ρομπότ και προσαρμόζει τη θέση του αγκώνα ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα προσέγγισης των στοιχείων της παλάμης στις επιθυμητές τιμές. Ο περιορισμός αυτός σε συνδυασμό με την έλλειψη αισθητήρων ενδέχεται να οδηγήσει σε διαφορετικές διατάξεις των χεριών του ρομπότ σε σχέση με τις διατάξεις των χεριών του εκπαιδευτή κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.
- Η μέθοδος γενίκευσης με απλή κλιμάκωση που χρησιμοποιείται για τις χειρονομίες δε δημιουργεί κάποιο μοντέλο συμπεριφοράς του χεριού και υποθέτει πως η εκτέλεση των χειρονομιών είναι ισοτροπική, δηλαδή πως η εκτέλεση των χειρονομιών πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο ανεξαρτήτως του σημείου από το οποίο ξεκινά η κίνηση. Όταν οι παράμετροι της γενίκευσης είναι παραπλήσιες των παραμέτρων της καταγραφής, το σφάλμα

που υπάρχει μεταξύ της υπολογιζόμενης κίνησης και της πραγματικής είναι μικρό, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται και η διαφορά των παραμέτρων.

6.1.4 Αξιολόγηση της υλοποίησης και των αποτελεσμάτων

Οι αρχικοί στόχοι της εργασίας επετεύχθησαν, δεδομένων των επιλογών που έγιναν και των περιορισμών που υπάρχουν. Συγκεκριμένα επετεύχθησαν τα ακόλουθα:

- Αναπτύχθηκε μια μέθοδος εκπαίδευσης χειρονομιών, η οποία υποστηρίζει ενοποιημένα διακριτές, περιοδικές και μεικτές χειρονομίες που εκτελούνται από ένα χέρι και μια απλοποιημένη εκδοχή χειρονομιών που εκτελούνται από το συνδυασμό δύο χεριών. Η μέθοδος αυτή είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει μόνο μια ανθρώπινη επίδειξη κάποιας χειρονομίας για τη διδασκαλία της. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής ελέγχθηκε πειραματικά στο εργαστήριο για όλες τις υποστηριζόμενες κατηγορίες χειρονομιών και αποδείχθηκε, τόσο μέσω γραφημάτων όσο και μέσω προσομοιώσεων, ότι δύναται να γενικεύσει οποιαδήποτε υποστηριζόμενη χειρονομία με φυσικό τρόπο, διατηρώντας τη γενική της μορφή, αλλά τροποποιώντας την κατάλληλα ώστε να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (π.χ. διάρκεια και σημείο πέρατος). Για τον ποσοτικό έλεγχο της γενίκευσης μιας διακριτής κίνησης παρουσιάστηκε επίσης ένας πίνακας που δείχνει το σφάλμα που υπάρχει μεταξύ της γενίκευσης και μιας καταγεγραμμένης κίνησης σε ένα πλέγμα 3×3 . Στον πίνακα αυτό φαίνεται ότι το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι της τάξης του 1 cm σε μια ακτίνα 10 cm από την κεντρική καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε για τη γενίκευση, γεγονός που φανερώνει την υψηλή ακρίβεια της γενίκευσης στη γειτονιά αυτή, δεδομένου του μήκους της τροχιάς της κεντρικής καταγραφής (περίπου 35 cm), αλλά και του συγκρίσιμου και συχνά μεγαλύτερου σφάλματος αναπαραγωγής λόγω της μεταβλητότητας της ανθρώπινης κίνησης. Όπως ήταν αναμενόμενο η ακρίβεια της αναπαραγωγής μια διδαγμένης κίνησης είναι της τάξης του 1 mm.
- Κατέστη δυνατή η υλοποίηση μιας μεθόδου που βασίζεται σε ανθρώπινη επίδειξη χειρονομιών και επιτρέπει τη συνεχή διακύμανση κάποιων πρόσθετων παραμέτρων των χειρονομιών ενός ρομπότ, όπως η εκφραστικότητα της κίνησης, με στόχο τη μεγιστοποίηση ορισμένων μετρήσιμων χαρακτηριστικών κοινωνικής αλληλεπίδρασης με τον άνθρωπο, όπως ο βαθμός προσοχής και η συμμετοχικότητα του ανθρώπου, κατά την αλληλεπίδραση του με το ρομπότ. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής ελέγχθηκε πειραματικά στο εργαστήριο και αποδείχθηκε, τόσο μέσω γραφημάτων όσο και μέσω προσομοιώσεων, ότι είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει επιδείξεις μιας χειρονομίας που αντιστοιχούν σε διαφορετικές βαθμούς έκφρασης της σχετικής πρόσθετης παραμέτρου (εκφραστικότητα), ώστε να παράξει μια χειρονομία της ίδιας γενικής μορφής, η οποία εκφράζει τη σχετική συμπεριφορά στον επιθυμητό βαθμό. Ο βαθμός αυτός μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς μέσω της μεθόδου αυτής, χωρίς να χρειάζεται κάποια πρόσθετη εκπαίδευση
- Υλοποιήθηκε ένας προσεγγιστικός τρόπος μετατροπής των ανθρώπινων κινήσεων σε κινήσεις ρομπότ NAO, ο οποίος ωστόσο παρήγαγε φυσικές κινήσεις, παρά τη διαφορά

των διαστάσεων και του αριθμού βαθμών ελευθερίας μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ ΝΑΟ, όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις που έγιναν.

- Η μέθοδος εκπαίδευσης χειρονομιών μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα ρομπότ εκτός του ΝΑΟ, με την κατάλληλη μετατροπή των κινήσεων, καθώς χρησιμοποιεί αυστηρά ανθρώπινες καταγραφές για την εκπαίδευση κι έτσι είναι ανεξάρτητη από τη ρομποτική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται.
- Δημιουργήθηκε μια υποτυπώδης βιβλιοθήκη ανθρωπίνων χειρονομιών η οποία περιέχει χειρονομίες από όλες τις κατηγορίες που εξετάστηκαν.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για τη βελτίωση και την επαύξηση των δυνατοτήτων της μεθόδου που παρουσιάστηκε γίνονται οι ακόλουθες προτάσεις:

- Η σωστή χρήση της μεθόδου και της βιβλιοθήκης κινήσεων προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συστήματος υψηλότερου επιπέδου, το οποίο θα επιλέγει τις κατάλληλες παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαραγωγή κάθε χειρονομίας, έτσι ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Η μέθοδος γενίκευσης των χειρονομιών προτείνεται να τροποποιηθεί, ώστε να λαμβάνει υπ' όψιν της πολλαπλά παρεμφερή παραδείγματα κάποιας κίνησης και να υπολογίζει την επιθυμητή τροχιά με τρόπο παρόμοιο με παρεμβολή ή με την ελαχιστοποίηση κάποιου κριτηρίου ή σφάλματος.
- Η μετατροπή των χειρονομιών από το περιβάλλον του εκπαιδευτή στο περιβάλλον του ρομπότ μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση το σχετικό προσανατολισμό των τμημάτων του χεριού (ώμος - αγκώνας και αγκώνας - καρπός) και όχι τη θέση της παλάμης σε σχέση με τον κορμό. Με τον τρόπο αυτό θα διατηρείται η διάταξη του χεριού και οι χειρονομίες θα φαίνονται πιο ανθρωπόμορφες και πιο ακριβείς.
- Η καταγραφή των κινήσεων του εκπαιδευτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με λιγότερο επεμβατικούς τρόπους, όπως η οπτική παρακολούθηση συγκεκριμένων δεικτών πάνω στο σώμα του, εφόσον διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας, αυξάνοντας έτσι την ευχέρεια των κινήσεων του και επιτρέποντας την καταγραφή χειρονομιών κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής αλληλεπίδρασης με άλλο άτομο ή κάποιο ρομπότ.
- Για την ορθότερη κωδικοποίηση χειρονομιών που πραγματοποιούνται με τη χρήση δύο χεριών χρειάζεται να ευρεθεί μια μέθοδος η οποία να εξάγει τους χωρικούς περιορισμούς που υπάρχουν μεταξύ των δύο χεριών κατά την κίνηση, αυστηρώς από τα δεδομένα, και να είναι σε θέση να τους κωδικοποιήσει κατάλληλα.

- Η βιβλιοθήκη χειρονομιών προτείνεται να εμπλουτιστεί με άλλα είδη κινήσεων, τα οποία μπορεί να περιέχουν και κινήσεις του κορμού ή του κεφαλιού του ρομπότ για την εκφορά πιο σύνθετων επικοινωνιακών μηνυμάτων και η μέθοδος εκπαίδευσης να επεκταθεί περαιτέρω ώστε είναι σε θέση να υποστηρίξει αυτά τα είδη χειρονομιών.

Βιβλιογραφία

- [1] Roland Aigner, Daniel Wigdor, Hrvoje Benko, Michael Haller, David Lindbauer, Alexandra Ion, Shengdong Zhao, and JTKV Koh. Understanding mid-air hand gestures: A study of human preferences in usage of gesture types for hci. *Microsoft Research TechReport MSR-TR-2012-111*, 2, 2012.
- [2] Baris Akgun, Maya Cakmak, Jae Wook Yoo, and Andrea Lockerd Thomaz. Trajectories and keyframes for kinesthetic teaching: A human-robot interaction perspective. In *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 391–398. ACM, 2012.
- [3] Sylvain Calinon, Florent Guenter, and Aude Billard. On learning, representing, and generalizing a task in a humanoid robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 37(2):286–298, 2007.
- [4] Ascension Technology Corporation. *3D Guidance trakSTAR User Guide*. Northern Digital Inc., 2014.
- [5] Athanasios C Dometios, You Zhou, Xanthi S Papageorgiou, Costas S Tzafestas, and Tamim Asfour. Vision-based online adaptation of motion primitives to dynamic surfaces: Application to an interactive robotic wiping task. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1410–1417, 2018.
- [6] Andrej Gams, Martin Do, Aleš Ude, Tamim Asfour, and Rüdiger Dillmann. On-line periodic movement and force-profile learning for adaptation to new surfaces. In *Proceedings of the 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 560–565. IEEE, 2010.
- [7] Andrej Gams, Auke J Ijspeert, Stefan Schaal, and Jadran Lenarčič. On-line learning and modulation of periodic movements with nonlinear dynamical systems. *Autonomous Robots*, 27(1):3–23, 2009.
- [8] Auke J Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. Learning attractor landscapes for learning motor primitives. In *Proceedings of the Conference on Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2003)*, pages 1547–1554, 2003.

- [9] Auke Jan Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. Learning rhythmic movements by demonstration using nonlinear oscillators. In *Proceedings of the IEEE/RST International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, pages 958–963, 2002.
- [10] Auke Jan Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*, volume 2, pages 1398–1403. IEEE, 2002.
- [11] Petar Kormushev, Dragomir N Nenchev, Sylvain Calinon, and Darwin G Caldwell. Upper-body kinesthetic teaching of a free-standing humanoid robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, pages 3970–3975. IEEE, 2011.
- [12] Yasser Mohammad and Toyooki Nishida. Tackling the correspondence problem. In *Proceedings of the International Conference on Active Media Technology*, pages 84–95. Springer, 2013.
- [13] Peter Pastor, Heiko Hoffmann, Tamim Asfour, and Stefan Schaal. Learning and generalization of motor skills by learning from demonstration. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2009)*, pages 763–768. IEEE, 2009.
- [14] Tadej Petrič, Andrej Gams, Auke Jan Ijspeert, and Leon Žlajpah. On-line frequency adaptation and movement imitation for rhythmic robotic tasks. *The International Journal of Robotics Research*, 30(14):1775–1788, 2011.
- [15] Akshara Rai, Franziska Meier, Auke Ijspeert, and Stefan Schaal. Learning coupling terms for obstacle avoidance. In *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 512–518. IEEE, 2014.
- [16] Akshara Rai, Giovanni Souto, Stefan Schaal, and Franziska Meier. Learning feedback terms for reactive planning and control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2017)*, pages 2184–2191. IEEE, 2017.
- [17] Abraham Savitzky and Marcel JE Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8):1627–1639, 1964.
- [18] Stefan Schaal. Dynamic movement primitives-a framework for motor control in humans and humanoid robotics. In *Adaptive motion of animals and machines*, pages 261–280. Springer, 2006.
- [19] Stefan Schaal, Auke Ijspeert, and Aude Billard. Computational approaches to motor learning by imitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1431):537–547, 2003.

- [20] Stefan Schaal, Peyman Mohajerin, and Auke Ijspeert. Dynamics systems vs. optimal control - a unifying view. *Progress in Brain Research*, 165:425–445, 2007.
- [21] Angus Stevenson. *Oxford Dictionary of English*. Oxford University Press, USA, 2010.
- [22] SK Tso and KP Liu. Hidden markov model for intelligent extraction of robot trajectory command from demonstrated trajectories. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 1996)*, pages 294–298. IEEE, 1996.
- [23] Aleš Ude, Andrej Gams, Tamim Asfour, and Jun Morimoto. Task-specific generalization of discrete and periodic dynamic movement primitives. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(5):800–815, 2010.
- [24] Fan Wang, Cheng Tang, Yongsheng Ou, and Yangsheng Xu. A real-time human imitation system. In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 3692–3697. IEEE, 2012.
- [25] Ching-yi Wu, Rong-jiuan Liing, Hsieh-ching Chen, Chia-ling Chen, and Keh-chung Lin. Arm and trunk movement kinematics during seated reaching within and beyond arm’s length in people with stroke: a validity study. *Physical Therapy*, 94(6):845–856, 2014.
- [26] You Zhou, Martin Do, and Tamim Asfour. Coordinate change dynamic movement primitives - a leader-follower approach. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016)*, pages 5481–5488. IEEE, 2016.
- [27] You Zhou, Martin Do, and Tamim Asfour. Learning and force adaptation for interactive actions. In *Proceedings of the IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016)*, pages 1129–1134. IEEE, 2016.